

ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA CONTROLO DAS REFLEXÕES EM LABORATÓRIO

TATIANA RIBEIRO FRAGA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

JULHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e amigos,

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia”

Robert Collier

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa o final de uma longa etapa, e como tal quero agradecer a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a minha formação e o desenvolvimento da presente dissertação.

Ao meu orientador e coorientador, Professor Francisco Taveira Pinto e Professor Paulo Rosa Santos, respetivamente, um enorme obrigada pela orientação, disponibilidade, compreensão e paciência. Obrigada pela ajuda na resolução dos vários problemas que foram surgindo no desenvolvimento desta dissertação, bem como os documentos facultados e o conhecimento transmitido para que este documento fosse possível.

Quero agradecer à Dona Maria de Lurdes, da secção direção financeira e recursos humanos, da empresa JABEIRA por ter fornecido as rolas que representou um material importantíssimo para a realização desta dissertação.

À empresa CARREIRAS, MOSCATO & CARVALHO, LDA, pelo material fornecido para a realização desta dissertação. Ao senhor Isaac Carvalho da direção administrativa, pela sua simpatia e disponibilidade ao telefone sempre que necessitava de novo material ou de alguma informação adicional.

Ao senhor Miguel Guerra, pelo seu empenho e dedicação em todo o trabalho experimental. Sempre com uma solução para todos os imprevistos que ocorriam. Pela companhia, nas longas semanas de ensaios, um obrigado.

A todos os meus amigos que fui conhecendo ao longo deste percurso, que sempre me transmitiram apoio e motivação para continuar. Em especial à Ana Gonçalves, à Barbara Patrício, ao João Albuquerque, Vanessa Silva e Maria João, que me acompanharam de perto ao longo destes anos nos momentos de descontração e nos estudos. Ao Rafael Lopes por toda a cumplicidade, amizade, carinho e apoio prestados ao longo deste ano.

À Tuna Feminina de Ciências do Porto, um grande obrigado. Agradeço tudo o que aprendi e o que a tuna contribuiu para o meu crescimento pessoal. A todas as pessoas que me fizeram acreditar e me acompanharam nos momentos descontraídos e nos momentos menos descontraídos, sempre acompanhados de música e animação, com certeza lembranças e amizades que levarei comigo.

Aos meus irmãos, Sandro Fraga e Silvana Fraga, um obrigado por todas as conversas, zangas e brincadeiras. Em especial ao meu irmão por me dar na cabeça, pelos conselhos e alguns conhecimentos transmitidos que de certa forma contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, que sem eles nada disto seria possível.

RESUMO

Os tanques de ondas têm sido utilizados para desenvolver vários estudos à escala reduzida para estruturas de projetos de engenharia costeira e portuária, avaliando o seu comportamento quando submetidos à agitação das ondas geradas pelo sistema de geração existente. Estas instalações têm sido melhoradas a par da necessidade de se obterem resultados fidedignos sendo que um fenómeno que constitui um problema ainda hoje de controlar, chamado reflexão das ondas.

Com efeito, as ondas geradas, ao incidirem nas paredes do tanque, originam reflexões sem correspondência com a realidade que se pretende reproduzir, que muitas vezes não é possível controlar completamente e de forma eficaz, ainda que existam dissipadores passivos e/ou ativos incorporados para amenizar as consequências desse fenómeno físico.

Na presente dissertação é desenvolvido uma estrutura que visa absorver, progressivamente, a energia das ondas. Para o efeito foram utilizados elementos absorventes que, quando convenientemente posicionados, promovem a dissipação da energia das ondas incidentes, minimizando a reflexão.

Numa primeira fase, tendo como referência estudos anteriores, foi feito o pré-dimensionamento da estrutura base que incorpora os elementos de absorção no seu interior, de modo a ser possível dissipar convenientemente a energia associada ao máximo comprimento de onda considerado no estudo. O desenvolvimento e a otimização da estrutura no que concerne ao seu comportamento à reflexão, requereu a realização de um estudo experimental, no tanque de ondas do laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP. Inicialmente foram realizados testes preliminares para determinar o comportamento de uma estrutura completamente reflectora, materializada por uma placa vertical opaca, seguindo-se da colocação de grelhas com porosidades e espaçamentos a decrescer de barlar para sotamar e, por fim, a utilização de uma alternativa inovadora com elementos flutuantes de cortiça. Com estes testes pretendia-se avaliar, de forma sistemática, a eficiência de cada uma das configurações na dissipação da energia das ondas, ou seja, na redução do coeficiente de reflexão, para as condições de agitação marítima consideradas.

Os ensaios foram realizados com dois tipos de ondas, regulares e irregulares, para dois níveis de água (0.30m e 0.50m), para duas alturas de onda/alturas de onda significativas (0.04m e 0.08m) e quatro períodos de onda/períodos de onda de pico (1.5s, 2.0s, 2.5s, 3.0s). Os resultados obtidos variaram, por vezes significativamente, com a configuração testada. Este estudo permitiu definir uma estrutura dissipadora que combina elementos flutuantes com grelhas e apresenta uma eficácia na absorção da energia das ondas próxima da pretendida (coeficiente de reflexão entre 10 e 30%).

No final são sugeridas algumas alterações que poderão melhorar o comportamento da estrutura e outras configurações que não foram ainda testadas, mas que poderão servir de ponto de partida para dar continuidade a este estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Reflexão das ondas, Absorção progressiva, Praia dissipadora, Tanque de ondas, Elementos flutuantes.

ABSTRACT

Wave tanks have been used to develop several studies in a small-scale studies for coastal and port engineering projects, evaluating their behavior when subjected to the action of waves generated by the existing wavemakers, and the phenomenon that constitutes a problem still today, called wave reflection.

In fact, in those experimental facilities, when the generated waves reach the walls of the tank, reflections are produced that do not exist in reality, which are often difficult or impossible to control completely and effectively, in spite of the existence of passive and/or active absorption systems to minimize the consequences of this physical phenomenon.

In the present dissertation, an innovative concept of a dissipating system is developed that aims to absorb progressively the incident wave energy. For that purpose, absorbent elements are used which, when correctly positioned, promote the dissipation of the energy of incident wave, thus minimizing the reflection.

In a first phase, and based on results of previous studies, a reference structure was pre-designed to allow incorporating the absorption elements required to dissipate the energy associated with the maximum wavelength considered in the study. The development and optimization of the system with respect to reflection required a comprehensive experimental study that was conducted in the wave tank of the Hydraulic Laboratory of the Hydraulics, Water Resources and Environment Division of FEUP. Initially, preliminary tests were carried out to determine the behavior of a completely reflective structure materialized by an opaque vertical plate. This work was followed by the testing of grids with porosities and spacing decreasing from the seaside to rear side and, finally, the use of floating elements made of cork. These tests intended to rigorously evaluate the efficiency of each of the configurations in the dissipation of wave energy, that is, in the reduction of the reflection coefficient, for the considered wave conditions.

The tests were performed with two types of waves, regular and irregular, for two water levels (0,30 and 0,50m), two wave heights/significant wave heights (0.04 and 0.08 m) and four wave periods/peak wave periods (1,5s; 2,0s; 2,5s; 3,0s). The results varied, sometimes significantly, with the tested configuration. This study allowed to define a dissipative system that combines floating elements with grids and presents an efficiency absorbing the energy of incident waves close to the desired one (reflection coefficients between 10 and 30%).

At the end, some changes are suggested that may improve the behavior of the structure and other configurations that have not been tested, but which may serve as a starting point to continue this study.

KEYWORDS : wave reflection, progressive absorption, dissipation beach, wave tanks, floating elements

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
 2 O FENÓMENO DA REFLEXÃO	 5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. DESCRIÇÃO DO FENÓMENO	8
2.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	9
2.2.2. REFLEXÃO TOTAL	10
2.2.3. REFLEXÃO PARCIAL	11
2.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO	12
2.3.1. INTRODUÇÃO	12
2.3.2. ANÁLISE DA REFLEXÃO EM ONDAS REGULARES	13
2.3.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO EM ONDAS IRREGULARES	13
2.4. PROBLEMAS COM O FENÓMENO DA REFLEXÃO EM LABORATÓRIO	14
2.5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	14
2.5.1. DISSIPADORES PASSIVOS.....	15
2.5.2. DISSIPADORES ATIVOS.....	22
 3 SOLUÇÕES PROPOSTAS PARA CONTROLO DE REFLEXÕES EM LABORATÓRIO	 25
3.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO ANTERIOR	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
3.2. MODELO	26
3.2.1. DIMENSÕES	26
3.2.2. MATERIAIS.....	27
3.2.2.1. Metal distendido	27
3.2.3. ELEMENTOS FLUTUANTES	28

3.3. CONFIGURAÇÕES A TESTAR EM LABORATÓRIO.	29
3.3.1. GRELHAS DE METAL DISTENDIDO.....	29
3.3.1.1. Posicionamento das aberturas das grelhas de metal distendido.	29
3.3.1.2. Definição do posicionamento das placas de Metal Distendido	30
3.3.1.3. Soluções com grelhas de metal distendido	31
3.3.2. ELEMENTOS FLUTUANTES	33
3.3.2.1. Soluções Simples	33
3.3.2.2. Soluções Mistas.....	34

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL 2D E ANÁLISE DE RESULTADOS 37

4.1. ENQUADRAMENTO	37
4.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	38
4.2.1. DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	38
4.3. PLANO DE ENSAIOS	40
4.3.1. CONDIÇÕES DE TESTE.....	40
4.3.2. SEQUÊNCIA DE TRABALHOS	42
4.3.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO	43
4.3.3.1. Agitação Regular	44
4.3.3.2. Agitação Irregular	44
4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
4.4.1. ESTRUTURA COM PLACA IMPERMEÁVEL DE ACRÍLICO.....	46
4.4.2. SISTEMA DE DISSIPACÃO COM METAL DISTENDIDO.....	47
4.4.2.1. Configuração 1	47
4.4.2.2. Configuração 2	49
4.4.3. ELEMENTOS FLUTUANTES	52
4.4.3.1. Configuração 1.....	52
4.4.3.2. Configuração 2	55
4.4.3.3. Configuração 3	57
4.4.3.4. Configuração 4	60
4.4.3.5. Configuração 5	62
4.4.4. ANÁLISE COMPARATIVA.....	64
4.4.4.1. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs. Grelhas de Metal Distendido	64
4.4.4.2. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs Elementos Flutuantes	65

Na Figura 4.38 apresenta-se o gráfico para as condições de baixa-mar em função do período, para as configurações utilizando uma câmara com elementos flutuantes quando comparado com a estrutura vertical opaca e para a Figura 4.39, para as condições de preia-mar. 65

4.4.4.3. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs. Elementos Flutuantes + Grelhas de Metal distendido 67

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS69

5.1. CONCLUSÕES 69

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 71

Referências Bibliográficas73

ANEXOS77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de perdas de carga transportada devido à forte agitação (à esquerda), Costa (2016); Naufrágio do navio motor grego “Amethyst” (à direita) [1] ;	1
Figura 1.2 - Exemplos de sistemas de absorção implementados em Laboratório, [3],[4].	2
Figura 1.3 - Tanque de ondas do LH da SHRHA da FEUP.	3
Figura 2.1 - Direção da propagação das partículas de água [4].	6
Figura 2.2 - Espectro de energia das ondas [5].	6
Figura 2.3 - Espectro de energia de Pierson-Moskowitz e de Jonswap.	7
Figura 2.4 - Fenómeno de reflexão frente a um obstáculo.	8
Figura 2.5 – “Clapóti Total”.	11
Figura 2.6 – “Clapóti Parcial”.	12
Figura 2.7 - Exemplos de praias de declive constante colocadas na extremidade oposta ao sistema de geração (à direita) e nos contornos do tanque (à esquerda)	15
Figura 2.8 - Esquemas das configurações dos absorvedores de energia da onda (Martins e Taniguchi, 2005).	16
Figura 2.9 - Folhas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989).	17
Figura 2.10 - Orientação das lâminas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989)... ..	17
Figura 2.11 - Várias disposições para os elementos de folhas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989).	18
Figura 2.12 - Dissipadores de ondas passivo nos contornos do tanque CCOB (Klinghammer, 2010). ..	20
Figura 2.13 - Diferenças entre a configuração em "v" com a configuração das placas verticais perfuradas, Klinghammer (2010).	20
Figura 2.14 - Configuração 1, Klinghammer (2010).	21
Figura 2.15 - Configuração 2, Klinghammer (2010).	21
Figura 2.16 - Deep Sea Basin do NMRI.	23
Figura 3.1 - Esboço 3D do esqueleto da estrutura dissipadora	27
Figura 3.2 - Exemplo de malhas de metal distendido, à esquerda, da forma losangular e à direita da forma hexagonal.	27
Figura 3.3 - Amostra do elemento flutuante utilizado no ensaio.	28
Figura 3.4 - Funcionamento da camada de elementos flutuantes limitada por uma parede impermeável e uma grelha de metal distendido	29
Figura 3.5 - Funcionamento da dissipação da energia devida à agitação.	30
Figura 3.6 - Corte da estrutura (a vermelho) que mostra a disposição das grelhas para a configuração 1, usando metal distendido	31
Figura 3.7 - Corte com a disposição das grelhas na estrutura para a configuração 2.	32

Figura 3.8 - Configuração 1 instalada no canal (à esquerda), suportes colocados sobre a estrutura, (à direita).....	33
Figura 3.9 - Configuração 2 instalada no canal do ensaio.	34
Figura 3.10 - Combinação das grelhas verticais com os elementos flutuantes, configuração 3.	34
Figura 3.11 - Combinação de grelhas verticais com os elementos flutuantes, adicionando um suporte de peso, configuração 4.	35
Figura 3.12 - Configuração 5, câmara de rolhas colocada na frente da estrutura.....	36
Figura 4.1 - Visão geral do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.	38
Figura 4.2 - Sondas de níveis hidrodinâmicos de haste longa utilizadas nos ensaios.	39
Figura 4.3 – Esquema do funcionamento do sistema de absorção ativo incorporado no sistema de geração, [Taveira-Pinto et. al, 2007]	39
Figura 4.4 – Condições de agitação, respeitando o limite do sistema de geração para a profundidade de água de 0,30m.....	41
Figura 4.5 – Condições de agitação, respeitando o limite do sistema de geração para uma profundidade de água de 0,50m.....	41
Figura 4.6 – Corte esquemático do canal que mostra a disposição de níveis hidrodinâmicos.	44
Figura 4.7 - Espectro resultante da análise da reflexão para agitação irregular ($H_s=0.04\text{m}$ e $T_p=3\text{s}$...	45
Figura 4.8 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.....	48
Figura 4.9 – Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.	48
Figura 4.10 – Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.	48
Figura 4.11 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.....	49
Figura 4.12 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.....	50
Figura 4.13 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.	51
Figura 4.14 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.	51
Figura 4.15 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.....	51
Figura 4.16 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.....	53
Figura 4.17 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.	54
Figura 4.18 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.	54
Figura 4.19 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.....	54

Figura 4.20 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.	56
Figura 4.21 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.....	56
Figura 4.22- Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.....	56
Figura 4.23 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda	57
Figura 4.24 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.	58
Figura 4.25 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.....	58
Figura 4.26 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.....	59
Figura 4.27 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.	59
Figura 4.28 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.	60
Figura 4.29 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.....	61
Figura 4.30 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.....	61
Figura 4.31 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda	61
Figura 4.32 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.	63
Figura 4.33 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.....	63
Figura 4.34 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.....	63
Figura 4.35 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a situação de baixa mar (profundidade igual a 0.30m).	64
Figura 4.36 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.	65
Figura 4.37 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de preia-mar.	65
Figura 4.38 - Análise Comparativa das configurações de elementos flutuantes com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.	66
Figura 4.39 - Análise Comparativa das configurações de elementos flutuantes com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de preia-mar.	66
Figura 4.40 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido combinados com elementos flutuantes em relação à placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.....	67

Figura 4.41 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido combinados com elementos flutuantes em relação à placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar. 67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Materiais colocados na superfície ou debaixo dos dissipadores passivos, Khalilabadi e Bidokhti (2011).....	15
Tabela 3.1 - Comprimento total da estrutura relativamente ao comprimento de onda.....	26
Tabela 3.2 - Porosidade das Placas de metal distendido	28
Tabela 3.3 - Posição dos nodos e antinodos para uma profundidade de água de 0,30 m.....	30
Tabela 3.4 - Posição dos nodos e antinodos para uma profundidade de água de 0.50 m.....	31
Tabela 3.5 - Espaçamentos e porosidades das grelhas verticais utilizadas para a configuração 1.....	32
Tabela 3.6 - Espaçamentos e Porosidades das grelhas verticais utilizadas para a configuração 2.	33
Tabela 3.7 - Porosidades e espaçamentos utilizados para as configurações 3 e 4.	35
Tabela 4.1 - Condições de teste a serem geradas nos ensaios.	42
Tabela 4.2 - Tempo de ciclo esperado para gerar o numero de ondas indicado.	43
Tabela 4.3 - Espaçamento das quatro sondas de níveis hidrodinâmicos.....	44
Tabela 4.4 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, usando uma estrutura vertical na zona a sotamar do sistema de absorção.....	46
Tabela 4.5 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 1 do sistema dissipativo com metal distendido.....	47
Tabela 4.6 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 2 do sistema dissipativo com metal distendido.....	50
Tabela 4.7 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 1 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.	53
Tabela 4.8 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 2 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.	55
Tabela 4.9 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 3 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.	57
Tabela 4.10 – Continuação da Tabela 4.9 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 3 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.....	58
Tabela 4.11 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 4 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.	60
Tabela 4.12 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 5 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.	62

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

a – amplitude [m]

a_i – amplitude da onda incidente [m]

a_r – amplitude da onda refletida [m]

C_r – coeficiente de reflexão

d – profundidade de água [m]

f – frequência [Hz]

f_p – frequência de pico [Hz]

Δf – intervalo de frequências [Hz]

g – aceleração gravítica [m/s^2]

H – altura de onda [m]

$H_{\text{máx}}$ – Altura máxima da onda [m]

H_s – altura significativa da onda [m]

H_{si} – altura significativa da onda incidente [m]

H_{sr} – altura significativa da onda refletida [m]

$H_{s,p}$ – altura significativa da onda pedida no sistema de geração [m]

$H_{s,g}$ – altura significativa da onda gerada no sistema de geração [m]

$\overline{H_{1/3}}$ – média do terço superior da altura de onda [m]

H/L – declividade da onda

H/d – altura relativa da onda

k – número da onda

L – comprimento de onda [m]

n – comprimento da sequência temporal

N – número de ondas geradas

S_i – densidade espectral incidente [m^2/Hz]

S_r – densidade espectral refletida [m^2/Hz]

T_p – período de onda de pico [s]

T – período de onda [s]

w – frequência angular [rad]

x_N – posição horizontal dos nodos de um sistema estacionário [m]

x_{AN} – posição horizontal dos antinodos de um sistema estacionário [m]

γ – fator de intensificação de pico

ρ – massa específica da água [kg/m^3]

σ – fator de forma

η - elevação da superfície livre da água

β – ângulo de inclinação do talude [$^\circ$]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Hoje em dias as reflexões das ondas têm sido problemáticas tanto no protótipo como em laboratório. A agitação incide nas estruturas ou no modelo reduzido refletindo parcial ou totalmente a sua energia, aumentando localmente os níveis de agitação devido a esse fenómeno. No protótipo este fenómeno é sentido por uma forte agitação criando problemas diversos, tais como:

- Estados de agitação perigosos para a navegação e acostagem dos navios nas estruturas portuárias, quer as atividades de carga e descarga de navios, bem como a segurança das pessoas, bens materiais, infraestruturas portuárias e embarcações presentes no interior de um porto.
- Estragos em navios, sistemas de amarração e defensas, provocados por forças elevadas nas zonas de amarração;
- Erosões nas fundações das estruturas de defesa costeira.

Estes problemas devido ao aumento da agitação provocada pelas reflexões podem induzir a naufrágios, perdas de carga transportada pelo navio, entre outros.



Figura 1.1 - Exemplo de perdas de carga transportada devido à forte agitação (à esquerda), Costa (2016); Naufrágio do navio motor grego “Amethyst” (à direita) [1] ;

Com isto existe uma necessidade de tentar chegar a uma mitigação dos riscos devidos a este fenómeno. Realizando estudos através de ensaios experimentais ou recorrendo a programas de modelação numérica para avaliar o comportamento para várias condições de agitação.

Sendo que a necessidade de estudar e aprofundar o conhecimento das estruturas de engenharia costeira e portuária tem crescido progressivamente, é necessário que a par disso os tanques de ondas estejam hoje em dia equipados com as tecnologias e materiais necessários para que os resultados que são obtidos sejam os mais fidedignos possíveis. Sendo que os tanques são utilizados maioritariamente para realizar ensaios em modelo reduzido dessas estruturas.

No entanto, em laboratório existe um problema que persiste relativamente ao controlo das reflexões existentes. As ondas incidentes geradas pelo sistema de geração devem simular condições de mar aberto o mais realistas possível. No entanto, no tanque existem alguns obstáculos como as paredes laterais, fazendo com que as ondas não se propaguem da mesma forma, criando reflexões que podem sobrepor-se às ondas geradas pelo sistema de geração, originando ondas de amplitudes diferentes, resultando em perturbações na agitação e a invalidação dos ensaios.

Para amenizar esse efeito, os sistemas de geração possuem, um sistema de absorção ativa que permite absorver a maior parte das reflexões e sistemas de absorção passiva na extremidade oposta ao sistema de geração. Os tipos de dissipadores passivos mais utilizados hoje em dia são, as praias e os dissipadores porosos. As praias podem ser lisas, porosas ou rugosas, de forma a melhorar o seu desempenho podendo o perfil da praia ser plana ou parabólica, com o objetivo de diminuir o espaço necessário. Os dissipadores porosos são constituídos por uma série de placas perfuradas com porosidades fixas ou progressivamente menores no sentido da propagação da onda.

Na Fig. 1.2 pode-se observar dois exemplos de tipologias que já foram implementadas em laboratório. À esquerda, tem-se o tanque de ondas curvilíneo em Edimburgo, utilizando um material que se resume a uma mistura de blocos de espuma de poliéster cortados e com rolos dobrados em Z de material geotêxtil conhecido como “Tensamat” (Taylor et. al, 2003). À direita pode-se observar o tanque de ondas do laboratório de Hidráulica da Universidade de Tel-Aviv, em Israel, em que o sistema de absorção utiliza um enchimento feito de material plástico poroso reduzindo assim as reflexões das ondas.



Figura 1.2 - Exemplos de sistemas de absorção implementados em Laboratório, [3],[4].

Na Fig. 1.3 está ilustrada outra tipologia utilizada e que neste momento se encontra no tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP, uma praia dissipativa de enrocamento de inclinação suave que

ocupa aproximadamente 8 m dos 28 m de comprimento que o tanque de ondas apresenta. O retira espaço útil ao tanque para realização de estudos experimentais de grande maginitude.

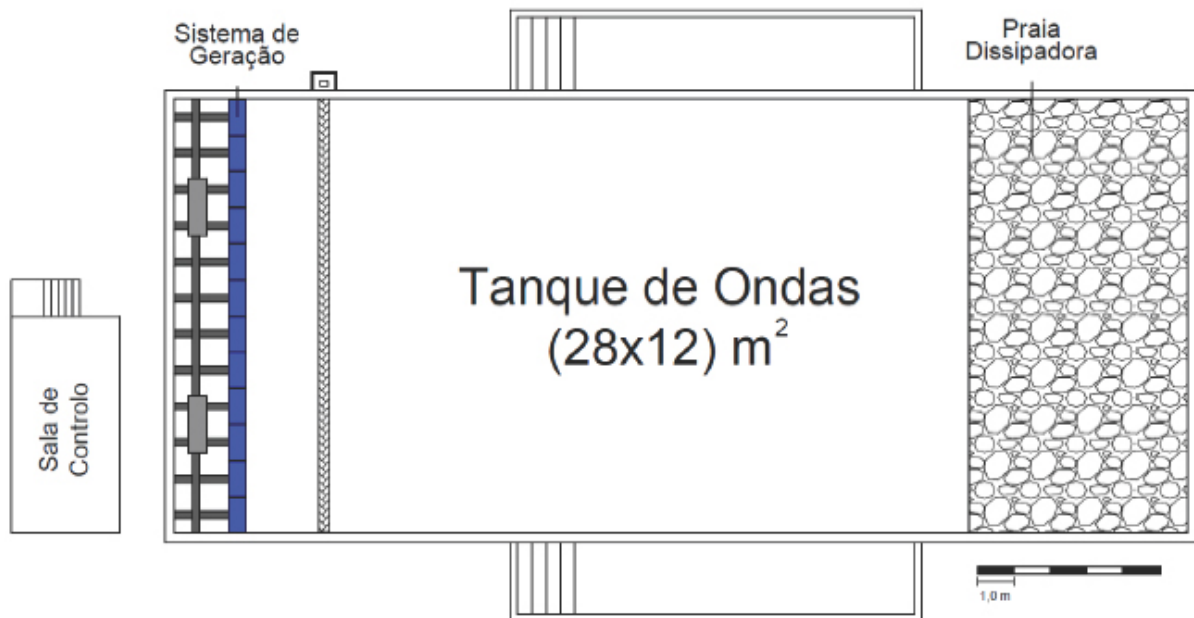


Figura 1.3 - Tanque de ondas do LH da SHRHA da FEUP.

Com esta dissertação, pretende-se estudar novas metodologias e soluções que permitam controlar as reflexões em laboratório nas fronteiras do tanque de ondas e/ou de certa forma chegar a uma solução que funcione de modo semelhante às soluções já existentes, ocupando um menor espaço. De tal forma que, o dimensionamento dos dissipadores de energia das ondas deve ser o primeiro passo a tomar, sendo que depende de dois fatores contraditórios. Por um lado, um dissipador de grandes dimensões tem uma eficácia maior, por outro ocupa uma maior área do tanque e pretende-se que uma estrutura deste tipo, dissipe a energia das ondas no menor espaço possível.

1.2. OBJETIVOS

Como o foco deste trabalho é desenvolver uma estrutura que absorva progressivamente a energia provocada pela agitação incidente, os objetivos são:

- Estudar e otimizar soluções que originam coeficientes de reflexão idênticos aos obtidos com os meios de dissipação de energia de ondas tradicionais;
- Otimizar o espaço útil do tanque de ondas;
- Conseguir uma solução mais económica;
- Melhorar a eficiência do tanque de ondas.

Para o efeito serão ensaiadas no Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, várias configurações usando grelhas de metal distendido de diferentes materiais, elementos flutuantes e posteriormente uma combinação entre estes dois materiais.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 5 capítulos. Neste primeiro capítulo foi realizado um breve enquadramento e a definição dos objetivos principais.

No capítulo 2 será descrita de forma mais aprofundada o fenómeno de reflexão, descrevendo as principais características que influenciam o fenómeno, os problemas que daí advêm e as medidas que o permitam solucionar.

No capítulo 3 serão apresentadas algumas conclusões retiradas dos estudos de alguns autores, bem como as configurações propostas que serão posteriormente ensaiadas.

No capítulo 4 será descrito todo o procedimento experimental e os modelos a testar no tanque de ondas, bem como a respetiva análise comparativa dos dados adquiridos para os diferentes cenários.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões relativas a este estudo e algumas considerações finais e desenvolvimentos futuros.

2 O FENÓMENO DA REFLEXÃO

2.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das características da agitação marítima torna-se fundamental para entender o fenómeno de reflexão propriamente dito. As ondas na superfície do oceano, para uma gama larga de períodos, são geradas principalmente pelo vento.

A generalidade das ondas marítimas são ondas superficiais, que se deslocam ao longo de uma superfície que separa dois meios distintos, como acontece na superfície marítima, que separa o meio hídrico do meio atmosférico. Pode-se dizer que são ondas progressivas, isto é, ondas que se movem em direção à costa, transferindo perturbações de um ponto onde é gerada para outro. No entanto, em alguns casos, podem originar ondas estacionárias ou quase-estacionárias.

Nas ondas superficiais marítimas existem duas principais forças de restauro, designadamente: a força gravitacional exercida pela Terra, e a tensão superficial da água (que tende a manter as moléculas juntas de forma a exporem a menor superfície possível ao ar). Ambas as forças são importantes na manutenção das ondas.

À medida que estas ondas se desenvolvem, a superfície do mar ganha um aspeto irregular, o que permite uma maior exposição ao vento e uma maior transferência da energia do vento para a superfície da água. Quando essa energia aumenta desenvolvem-se ondas de gravidade. A energia do vento faz aumentar a altura de onda, o comprimento de onda e a celeridade da onda. Mas quando a velocidade das ondas iguala a do vento, já não é transferida mais energia à onda. A partir desse momento a energia é dissipada, atingindo-se assim, o estado de mar completamente desenvolvido em que a energia das ondas já não aumenta. No entanto, como o vento sopra com velocidades variáveis e com direções não homogêneas, as ondas resultantes não são uniformes, verificando-se variabilidade nas características das ondas.

À medida que as ondas se propagam em direção à costa, as águas profundas passam para águas pouco profundas, interagindo com maior intensidade com a sua aproximação. As órbitas das partículas de água que em águas profundas eram circulares passam abaixo da superfície a ter uma forma de elipse à medida que a profundidade diminui. A celeridade da onda começa a ser determinada pela profundidade da coluna de água, e como esta vai diminuindo, a progressão da onda é mais lenta. Sendo a energia da onda em função da sua altura, havendo diminuição da velocidade, Fig.2.1.

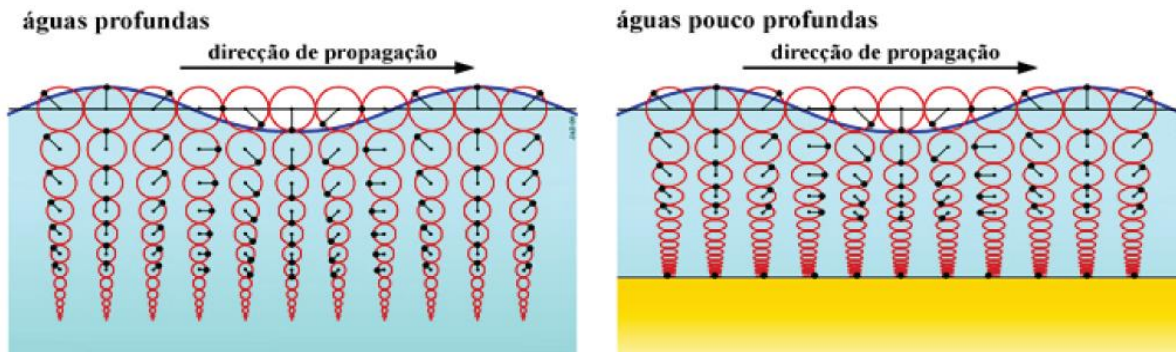


Figura 2.1 - Direcção da propagação das partículas de água [4].

As ondas podem ser classificadas em ondas regulares ou ondas irregulares. O tipo de agitação que se verifica na superfície do mar é tipicamente irregular e tridimensional, pois altera-se com o tempo e as suas componentes propagam-se em várias direções, sendo impossível matematicamente definir uma relação que determine o seu comportamento. No entanto hoje em dia, existem tecnologias e ferramentas que permitem simular as condições de mar aberto, por modelação física ou modelação numérica.

De um modo geral, podem-se descrever as ondas regulares como ondas periódicas e uniformes, tendo o comprimento de onda, o período e a altura de onda bem definidos.

As ondas irregulares podem ser descritas pela sobreposição linear de ondas regulares com diferentes amplitudes, frequências, fases e direção. São caracterizadas por um espectro de energia que descreve a distribuição de energia em relação à sua frequência ou período, na Fig.2.2.

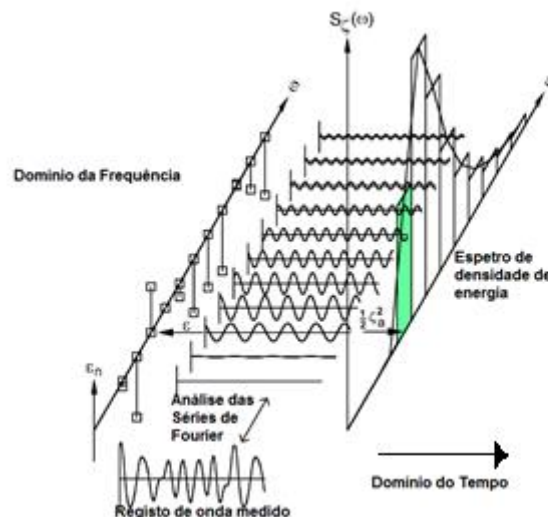


Figura 2.2 - Espectro de energia das ondas [5].

Para representar a superfície do mar, é usual recorrer-se então à análise espectral. Esta análise pode ser feita no domínio do tempo ou frequência, sendo mais usual adotar-se a segunda opção. A análise espectral permite descrever a distribuição da energia da onda por frequências, através do espectro de energia. Uma vez que uma onda irregular é composta por ondas de várias frequências, as mesmas são ajustadas em intervalos de frequência, também denominadas de bandas de frequência, Δf . O espectro de

energia de onda é então traduzido pela função resultante do valor da energia, S_η associado a cada frequência, f , determinado por:

$$S_\eta = \frac{\rho g a^2}{2\Delta f} \quad (2.1)$$

em que g , representa a aceleração gravítica, a a amplitude da onda e ρ a massa específica da água e Δf o intervalo de frequências. A partir do espetro é possível estimar os parâmetros que definem o estado de mar, como o período de pico, T_p ou a altura de onda significativa, H_s :

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (2.2)$$

em que f_p representa a frequência de pico, ou seja, a frequência com maior energia no espetro. A altura de onda significativa é considerada, como a média do terço superior das alturas de onda ordenadas de forma decrescente de um dado registo. Sendo este parâmetro dependente de um parâmetro espectral de ordem n , dado por:

$$m_n = \int f_n S_n \delta f \quad (2.3)$$

a altura de onda significativa, H_s :

$$\bar{H}_{1/3} = H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.4)$$

Através do espetro pode ser ainda definido a largura da banda espectral, que dá a informação da dispersão de energia por frequência.

Existem vários modelos de representação espectral, dentre deles destaca-se o proposto por Pierson (1964) e Moskowitz (1964), ou espetro de Pierson-Moskowitz e o espetro de Jonswap que foi desenvolvido com base num estudo para uma extensa gama de dados de ondas do programa Joint North Sea Wave Project, realizado entre 1968 e 1969, com o objetivo de compreender o processo de formação das ondas geradas pelo vento. De uma forma simplista, para distinguir estes dois espetros, pode dizer-se que o espetro de Pierson-Moskowitz abrange uma maior gama de frequências, enquanto o de Jonswap tem um pico espectral mais pronunciado, sendo descrito por um fator de intensificação de pico γ , Figura 2.3.

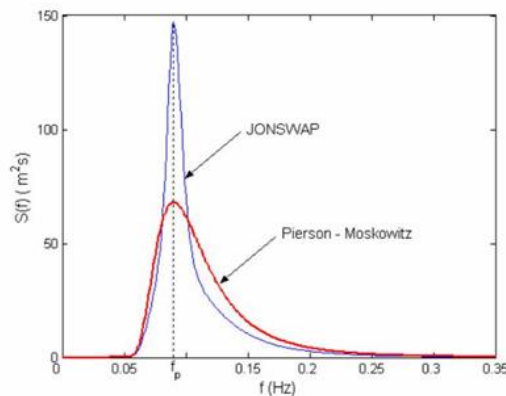


Figura 2.3 - Espetro de energia de Pierson-Moskowitz e de Jonswap

No âmbito desta dissertação iremos utilizar o espectro de Jonswap para efetuar a análise dos ensaios. A equação básica que a define é:

$$S_w = \frac{ag^2}{w^2} \times e^{\left[-1.25\left(\frac{w}{w_0}\right)^{-4}\right]} \times \gamma e^{\left[\frac{(w-w_0)^2}{2\sigma^2 w_0^2}\right]} \quad (2.5)$$

sendo, γ o fator de intensificação de pico e σ o fator de forma. O espectro Jonswap é caracterizado essencialmente por estes dois parâmetros.

Neste capítulo será descrito de forma resumida o fenómeno da reflexão, apresentado-se a teoria que melhor define as condições de ocorrência tanto com agitação regular como irregular, bem como as suas características, os problemas verificados em laboratório e as medidas que permitem atenuar este fenómeno.

2.2. DESCRIÇÃO DO FENÓMENO

A reflexão das ondas é o fenómeno que ocorre quando uma onda incide sobre um obstáculo e retorna ao meio de propagação, mantendo, ou não, as características da onda incidente.

Nem toda a energia das ondas é dissipada na interação com o obstáculo, seja ele liso ou rugoso, inclinado ou vertical, pois a energia acaba por ser refletida total ou parcialmente para barlamar com uma perda de energia. Este processo ocorre de acordo com a lei da Reflexão segundo a qual, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Na Figura 2.4, está representada a incidência de uma onda em planta, admitindo os fundos a uma profundidade constante.

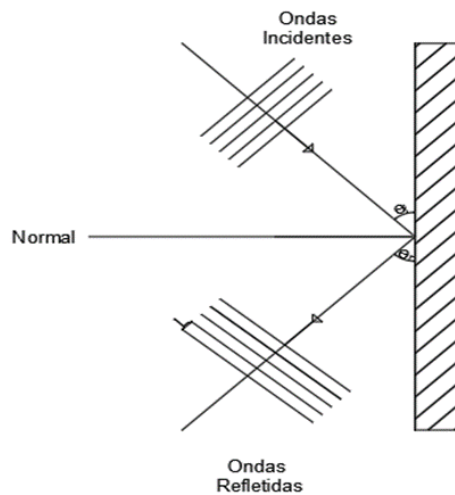


Figura 2.4 - Fenómeno de reflexão frente a um obstáculo.

Caso a incidência seja normal ($\theta = 0$), e o obstáculo constituído por uma parede vertical, irá ocorrer uma reflexão total, com formação de ondas estacionárias. Na hidrodinâmica, às ondas estacionárias dá-se a designação de “clapóti” resultante da interação da onda incidente com a refletida com características semelhantes. As partículas não descrevem orbitas circulares como acontece nas ondas progressivas.

Neste caso, as partículas estacionárias localizam-se nos nós e nos antinodos é onde há oscilação máxima vertical entre a crista e a cava. Em teoria, a altura de onda produzida pela reflexão total, pode atingir o dobro da altura da onda incidente, que será posteriormente explicado.

A previsão do nível da energia da onda refletida tem sido investigada através de estudos analíticos e experimentais. As metodologias utilizadas para a avaliação do comportamento de uma estrutura em relação a este fenómeno inclui equações empíricas e modelação matemática para estimar a parcela de energia que é refletida por uma praia ou uma estrutura artificial. Uma delas é através do coeficiente de reflexão que se traduz na seguinte expressão,

$$Cr = \frac{Hr}{Hi} \quad (2.6)$$

em que H_i , representa a altura da onda incidente e H_r a altura da onda refletida. O coeficiente de reflexão é zero quando a energia da onda incidente é totalmente absorvida e igual à unidade quando é totalmente refletida.

As oscilações marítimas, possuem uma vasta gama de frequências, e, em geral o coeficiente de reflexão reduz-se com o aumento da frequência, ou seja, ondas de baixas frequências são mais refletidas que as ondas de alta frequência.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

Para a previsão da reflexão da agitação provocadas por estruturas ou praias, existem expressões teóricas que no geral, são função da geometria da estrutura, em particular a inclinação do talude. O coeficiente de reflexão depende da porosidade, da rugosidade e profundidade relativa da água, sendo d , a profundidade de água e L , o comprimento de onda, ou seja,

- Inclinação do Talude(β)
 - Rugosidade
 - Porosidade
- } Estrutura Refletora

A reflexão é menor, quanto maior ou menor o valor destes parâmetros da estrutura refletora. Se a rugosidade é muito grande as partículas de água tendem a dissipar mais energia quando este parâmetro é mais elevado. Quanto maior a porosidade não há necessariamente maior dissipação. O jogo que existe com o parâmetro da porosidade consiste em diminuir progressivamente este parâmetro na direção da propagação da onda de modo a que a dissipação seja eficiente. Quanto à inclinação do talude deve estar compreendida entre 1: 6 a 1:10, como referiremos à frente neste capítulo, para que os coeficientes de reflexão obtidos sejam próximos do aceitável (5% - 20%). A junção destes parâmetros torna a eficiência da estrutura mais completa e melhor.

- Declividade da onda (H/L)
 - Altura da onda relativa (H/d)
- } Características da onda

A reflexão depende também das características da onda, quanto às alturas de onda relativa, os coeficientes de reflexão tendem a obter valores menores quando a altura de onda é maior.

2.2.2. REFLEXÃO TOTAL

A oscilação existente frente a um obstáculo refletor resulta da sobreposição de duas ondas com o mesmo período, mas de sentidos opostos. Assim, a elevação da superfície livre de água, η , é dada por:

$$\eta(x, t) = \underbrace{a_i \cos(kx - wt)}_{\text{Superfície livre da onda incidente}} + \underbrace{a_r \cos(kx + wt)}_{\text{Superfície livre da onda refletida}} \quad (2.7)$$

em que, a_i representa a amplitude da onda incidente, a_r a amplitude da onda refletida, k , o número de onda e w , a frequência angular da onda. Se a reflexão da onda é total, a onda incidente e a onda refletida têm a mesma amplitude ($a_i = a_r = \frac{H}{2}$) e o coeficiente de reflexão é igual à unidade. A onda que resulta da sobreposição destas duas é denominada de *clapotis total*, e pode ser expressa da seguinte forma,

$$\eta(x, t) = 2a \sin(kx) \cos(wt) \quad (2.8)$$

$$\eta(x, t) = \sin(kx) \cos(wt) \quad (2.9)$$

Sabendo que a amplitude da onda pode ser dada por,

$$a(x) = -H \cos(kx) \quad (2.10)$$

A equação que define a superfície livre da água, é dada por:

$$\eta(x, t) = a(x) \sin(wt) \quad (2.11)$$

Através das equações 2.10 e 2.11 pode-se concluir que a superfície livre da *clapotis total* varia sinusoidalmente no tempo e tem uma amplitude que varia sinusoidalmente no espaço. Consegue-se determinar em que instantes a superfície livre está em repouso, anulando a função $\sin(wt)$, em toda a extensão.

$$\sin(wt) = 0 \Leftrightarrow wt = n\pi \Leftrightarrow t = n \frac{T}{2} \quad (2.12)$$

$$\text{com } w = \frac{2\pi}{T} \text{ e } n=0, \dots$$

Os pontos onde se verifica oscilação vertical máxima designam-se por antinodos ou ventres. Os pontos onde não se verifica uma oscilação vertical são designados por nodos. A posição dos nodos é determinada anulando a função da amplitude,

$$a(x_N) = H \cos(kx_N) = 0 \Leftrightarrow kx_N = \frac{\pi}{2} + n\pi \Leftrightarrow x_N = \frac{L}{4} + n \frac{L}{2} \quad (2.13)$$

$$\text{com, } k = \frac{2\pi}{L} \text{ e } n=0, \dots$$

Pode-se verificar que o primeiro nodo se encontra a um quarto do comprimento de onda da estrutura refletora e os restantes espaçados a metade do comprimento de onda deste.

Para o cálculo da posição dos pontos onde se verifica a máxima oscilação vertical, os antinodos, iguala-se a função amplitude à altura de onda e vem que:

$$a(x_{AN}) = H \cos(kx_{AN}) = H \Leftrightarrow \cos(kx_{AN}) = 1 \Leftrightarrow x_{AN} = n \frac{L}{2} \quad (2.14)$$

$$\text{Com, } k = \frac{2\pi}{L} \text{ e } n=0, \dots$$

O primeiro antinodo encontra-se junto à parede refletora e os seguintes espaçados de metade de um comprimento de onda, uns dos outros, Figura 2.5.

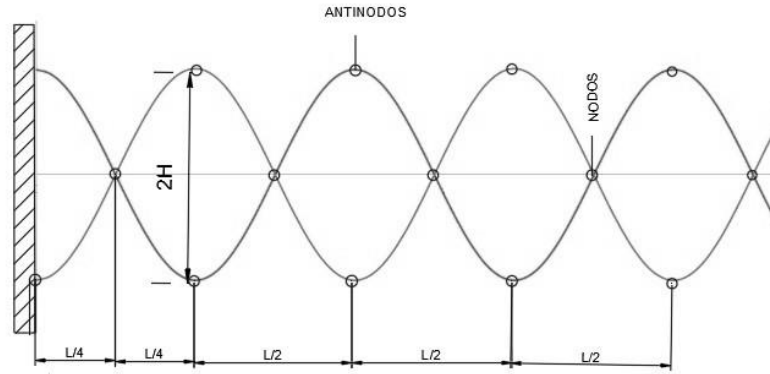


Figura 2.5 – “Clapóti Total”.

Note-se que a componente horizontal da velocidade é nula nos casos em que a oscilação vertical é máxima.

2.2.3. REFLEXÃO PARCIAL

A reflexão é parcial, quando a energia da onda incidente não é totalmente refletida pela parede refletora, ou seja, o coeficiente de reflexão é inferior a 1.

$$a_r < a_i = \frac{H}{2} \quad (2.15)$$

Na reflexão parcial, o movimento ondulatório que se verifica em frente ao obstáculo refletor resulta da soma de duas ondas estacionárias com diferentes amplitudes, a_m e a_M com desfaseamento, no tempo e no espaço de $\frac{\pi}{2}$ uma da outra.

Admitindo que $a_M = a_i + a_r$ e $a_m = a_i - a_r$, a expressão que representa a superfície livre da onda é:

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= a_m \sin(kx) \cos(\omega t) - a_M \cos(kx) \sin(\omega t) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \eta(x, t) &= -a_m \cos\left(kx - \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - a_M \cos(kx) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.16)$$

A superfície livre da onda nunca atinge o estado de repouso, uma vez que os instantes de anulamento de uma onda, corresponde aos extremos da outra. Ou seja, os nós e antinodos de uma das ondas estacionárias, ocorrem nas posições dos antinodos e nós da outra onda, respetivamente, Fig.2.6.

Assim como se verifica na reflexão total, na reflexão parcial, a superfície livre oscila sinusoidalmente no tempo, com uma amplitude que varia sinusoidalmente no espaço. Na expressão 2.19 podemos confirmar a conclusão daqui retirada

Considerando:

$$a_M \cos(kx) = a \cos(\alpha) \quad (2.17)$$

$$a_m \cos\left(kx - \frac{\pi}{2}\right) = a_m \sin(kx) = a \sin(\alpha) \quad (2.18)$$

A equação 2.19 vem que:

$$\eta(x, t) = a \sin(\alpha) \cos(\alpha) - a \cos(\alpha) \sin(\alpha) = -a \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.19)$$

$$\text{com } \alpha = \tan^{-1} \left[\frac{a_m}{a_M} \tan(kx) \right]$$

Então,

$$a^2 = a_M^2 \cos^2(kx) + a_m^2 \sin^2(kx) \quad (2.20)$$

$$\Rightarrow a(x) = \sqrt{a_i^2 + a_r^2 + 2a_i a_r \cos(2kx)}$$

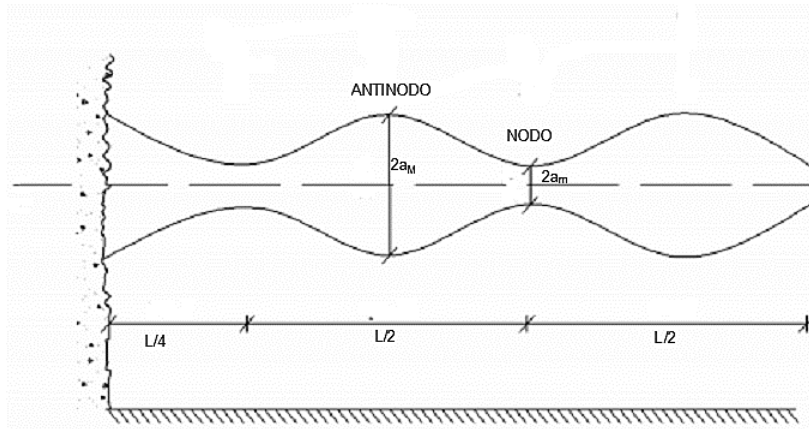


Figura 2.6 – “Clapótiis Parcial”.

2.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO

2.3.1. INTRODUÇÃO

Em todos os ensaios com agitação em laboratório, é necessário fazer a separação da agitação incidente no modelo, da refletida. O principal objetivo dessa separação deve-se ao facto de a resposta do modelo em estudo depender das características da onda incidente. De forma a permitir essa separação, foram

desenvolvidos diversos métodos com base em estudos laboratoriais realizados em canais bidimensionais.

Para a análise da reflexão em ondas regulares o procedimento não é tão complexo. A oscilação apresenta uma frequência e um comprimento de onda constante, pelo que o espaçamento entre sondas é fixo, então basta utilizar a informação de duas sondas que estejam com uma distância de pelo menos um quarto do comprimento de onda, para obter resultados satisfatórios.

O estudo da agitação irregular é realizado através da análise espectral como já foi referido, caracteriza a distribuição desse estado de agitação para diferentes períodos de onda, das diferentes componentes da qual pode ser decomposto. A essa distribuição dá-se o nome de espectro de energia, existindo vários métodos, como o de Goda e Suzuki, Marcou, ou Mansard e Funke (Pinto, 2001), que permite fazer a análise da reflexão para este estado de agitação. Para esta análise o melhor é a utilização de várias sondas a que corresponde vários espaçamentos, abrangendo um maior numero de frequências de onda. Nesta dissertação utilizamos o método de Mansard e Funke ou método dos mínimos quadrados para a análise da agitação irregular.

2.3.2. ANÁLISE DA REFLEXÃO EM ONDAS REGULARES

Como foi referido anteriormente, o coeficiente de reflexão é definido pelo rácio entre a altura de onda significativa refletida e altura de onda significativa incidente. Para agitação regular, existe a criação de ondas estacionárias com nodos e antinodos, pelo que o coeficiente de reflexão pode ser calculado pelas alturas registadas por uma sonda de nível hidrodinâmico.

Um método expedito para estimar a reflexão de ondas regulares, corresponde a medir a oscilação máxima e mínima verificada na onda estacionária. A aplicação deste método, requer o deslocamento de uma sonda ao longo do canal paralelamente a direção da propagação das ondas de forma a medir o máximo e mínimo da envolvente. Quando se usa o sistema de absorção ativo, o canal de ondas deve ser suficientemente longo para permitir que as medições sejam efetuadas antes das ondas refletidas serem novamente refletidas pelo bateador e atinjam a área de medição. Por outro lado, podem ser usadas duas sondas separadas de uma distância fixa e igual a um quarto do comprimento de onda. Este processo, considera que as sondas estão colocadas em duas secções correspondentes ao máximo e ao mínimo da envolvente da onda estacionária, o que pode ser difícil de obter (Pinto, 2001).

2.3.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO EM ONDAS IRREGULARES

Através da análise das séries temporais podemos obter os espectros da agitação incidente e refletida das ondas regulares, através do método das sondas com espaçamentos conhecidos (Pinto, 2001).

Este método faz a análise das series temporais correspondentes aos registos da elevação da superfície livre da água, obtidas com duas ou mais sondas fixas localizadas numa linha paralela à propagação das ondas. No presente subcapítulo será abordada a teoria desenvolvida por Mansard e Funke ou teoria do mínimos quadrados.

Mansard e Funke, 1980, apresentaram o método dos mínimos quadrados para fazer a separação das componentes da agitação, incidente e refletida, a partir de registos simultâneos das series temporais em três sondas com espaçamentos conhecidos. Este método faz a análise através de espectros de correlação cruzada dos vários pares de sondas, conduzindo a uma estimativa da energia da onda incidente e refletida e o sinal de ruído e posteriormente o coeficiente de reflexão global.

O método dos mínimos quadrados é usado para minimizar o ruído nas sondas utilizadas para a análise, baseando-se na análise das diferenças de fase entre as sondas e proporcionando estabilidade nos valores obtidos e um aumento do intervalo de frequências analisadas, com menor sensibilidade aos espaçamentos das sondas. Este método respeita a teoria linear das ondas, assumindo que as sondas estão colocadas em fundos horizontais.

A determinação do espaçamento ótimo das sondas não é pacífica, devendo ser fixada de modo a obter uma maior concordância e analisar um maior número de bandas de frequência. O National Research Council e Marcou (1969) recomendam para ondas regulares os seguintes espaçamentos das sondas:

$$X_{12} = \frac{Lp}{10} ; \frac{Lp}{6} < X_{13} < \frac{Lp}{3} ; \quad (2.21)$$

É de referir ainda que a primeira e última sonda se localizem a uma distância superior a um comprimento de onda do sistema de geração e do modelo a ser ensaiada, associada à frequência de pico, para evitar erros de medição. Para o estudo deste trabalho foram utilizadas 4 sondas alinhadas paralelamente a direção da propagação das ondas e a determinação do seu espaçamento será explicado mais detalhadamente no capítulo 4.

2.4. PROBLEMAS COM O FENÓMENO DA REFLEXÃO EM LABORATÓRIO

Como já foi referido neste documento o aumento do conhecimento em testar novas soluções, mostra que as ferramentas de pesquisa experimental, incluindo os software, os equipamentos de medição e os próprios elementos incorporados no tanque de ondas necessitam de ser aprimoradas.

Um problema que é continuamente visível nos tanques de onda é o controlo das reflexões que acontecem no seu interior, quando se dá início aos ensaios, isto deve-se em geral, aos efeitos laboratoriais. Esses efeitos resultam, sobretudo, da incapacidade de reproduzir com rigor as condições de agitação marítima no prototipo.

Na natureza, as ondas ao incidirem numa praia ou estrutura de defesa costeira dissipam uma parte significativa da sua energia, porém, parte da energia é refletida em direção ao largo. Este processo não se verifica em laboratório, pois as ondas incidem sobre as paredes do tanque originando reflexões que podem atingir o gerador de ondas e, ser re-refletidas de novo para o local onde está instalado o modelo em estudo, conduzindo a perturbações e colocando em causa a qualidade dos ensaios e a validade dos resultados, pois tais condições não correspondem à realidade.

Para isso foram incorporadas medidas que tentem amenizar e controlar esse efeito de forma a aproximar o que se pretende às condições realistas.

2.5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

Para amenizar o efeito das reflexões foram então colocados nos tanques de onda sistemas de dissipação da energia das ondas, que podem ser classificados em dissipadores passivos e dissipadores ativos.

A utilização de dissipadores ativos possui um alto custo e ainda é muito limitada, ainda que há casos em que o próprio sistema de geração das ondas já está programada para absorver as ondas refletidas.

2.5.1. DISSIPADORES PASSIVOS

Os dissipadores passivos de ondas, correntemente utilizados são, praias de inclinação constante colocadas na extremidade oposta ao sistema de geração (Oullet e Data, 1986). A praia pode ser construída a partir de vários materiais, como cascalho, areia ou pedras, Fig.2.7.

As inclinações das praias devem ser suaves de modo a que a absorção das ondas seja eficiente. As inclinações tipicamente utilizadas variam de 1: 6 a 1:10, (Ouellet et. al, 1986). Estas inclinações podem por vezes conduzir a comprimentos do dissipador mais longos, usando assim um espaço valioso do tanque (Dalrymple et al., 2002). Para reduzir esse comprimento, são realizados diferentes arranjos incluindo a adição de rugosidade na superfície e o uso de materiais porosos.



Figura 2.7 - Exemplos de praias de declive constante colocadas na extremidade oposta ao sistema de geração (à direita) e nos contornos do tanque (à esquerda)

Khalilabadi e Bidokhti (2011) realizaram um levantamento de instalações de laboratórios em todo o mundo, com o objetivo de encontrar um dissipador de ondas que satisfaça as restrições acima mencionadas. Do levantamento a maioria utiliza uma praia de declive constante, outra parte uma variação do declive e por fim uma declividade parabólica que pode ou não atingir o fundo.

Com o fim de aumentar a rugosidade na superfície ou aumentar a porosidade existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Materiais colocados na superfície ou debaixo dos dissipadores passivos, Khalilabadi e Bidokhti (2011).

	Material	% de laboratórios que usam o material
1	Betão	1.5%
2	Areia, Cascalho e pedra	22.0%
3	Caixas preenchidas por materiais porosos	10.0%
4	Grelhas de Metal distendido	15.0%
5	Barras Transversais perfuradas	18.0%
6	Crina de cavalo	14.0%
7	Contraplacado perfurado	5.0%
8	Terrafix	1.5%
9	Ripas de Madeira	5.0%

No laboratório de Engenharia Naval e Oceânica do DENO-EPUSP, Martins e Taniguchi (2005), realizaram um estudo de modo a melhorar o tanque de ondas de dimensões reduzidas. O tanque está equipado com um sistema de geração tipo flap acionado por um conjunto eletromecânico e na extremidade oposta por um absorvedor tipo rampa com inclinação dupla, ripada, construída com madeira devidamente lastrada.

Neste estudo foram realizados ensaios com uma configuração considerada “original” na primeira série, em que o absorvedor consiste numa rampa de dupla inclinação do fundo até ao topo e, numa segunda série com algumas alterações no absorvedor, onde a inclinação da rampa com dupla inclinação permanece, mas com ângulos menores e elevada em relação ao fundo do tanque. No espaço entre a rampa elevada e o fundo do tanque, instalaram-se telas plásticas verticais esticadas no sentido transversal do tanque, ortogonal a propagação da onda, na Figura 2.8 estão ilustradas as seguintes configurações.

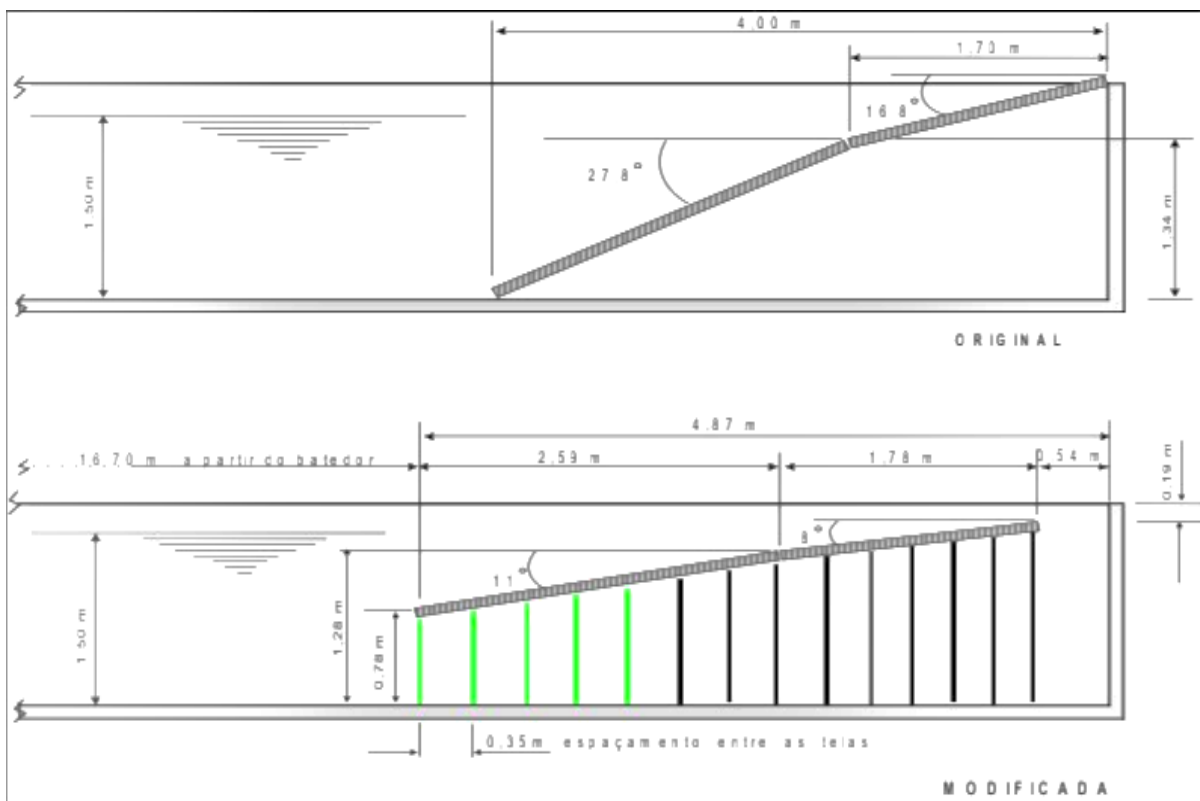


Figura 2.8 - Esquemas das configurações dos absorvedores de energia da onda (Martins e Taniguchi, 2005).

Os valores determinados dos coeficientes de reflexão mostraram ser satisfatórios quando comparados com os manuais do ITTC (International Towing Tank Conference, associação responsável pela previsão do desempenho hidrodinâmico de navios e instalações marítimas com base nos resultados de ensaios físicos e numéricos)

Chakrabarti (1994) diz que nos tanques de ondas existentes nos laboratórios, se houver espaço suficiente disponível, um absorvedor de ondas longo pode ser eficiente na absorção das ondas refletidas. No entanto, os tanques são limitados, pelo que se requer a utilização de um absorvedor com um comprimento menor e inclinações mais suaves. Testes laboratoriais foram realizados para determinar a porosidade, declividade e o comprimento ótimo de um absorvedor [Beach Erosion Board (1949), Straub,

et. Al,1956]. Concluiu-se que o material de grande porosidade é desejável se o comprimento mínimo for necessário. A melhor absorção foi obtida com uma porosidade de 60 a 80 %.

Outro conceito para praias em laboratórios é um absorvedor de ondas progressivo (Le Méhauté, 1972), que consiste em materiais cuja porosidade diminui no sentido de barlamar para sotamar da estrutura. Le Méhauté, utilizou lâminas de alumínio para alcançar este objetivo. A proposta deste autor consistia em otimizar a estrutura dissipadora progressivamente para minimizar as reflexões durante a dissipação gradual de energia. Isto permite um comprimento total da estrutura menor que o comprimento de onda incidente. Ensaio permitiram validar a teoria deste autor.

O mesmo princípio foi adotado por Jamieson e Mansard (1987), com um dissipador de ondas com placas verticais perfuradas. Cada sequência de placas tinha tendência a compactar na direção da propagação das ondas incidentes, ou seja, de barlamar para sotamar tinha uma tendência a consensar o espaçamento entre as placas. Através de alguns ensaios realizados obteve-se coeficientes de reflexão relativamente baixos, fundamentando o princípio básico da teoria da absorção progressiva das ondas. No entanto concluiu-se que esta solução (Figura 2.9), não aparenta ser a melhor solução, uma vez que com o tempo a compactação das placas modifica (talvez pela existência de uma flexão provocada pela agitação a longo prazo) e a sua eficiência é afetada.

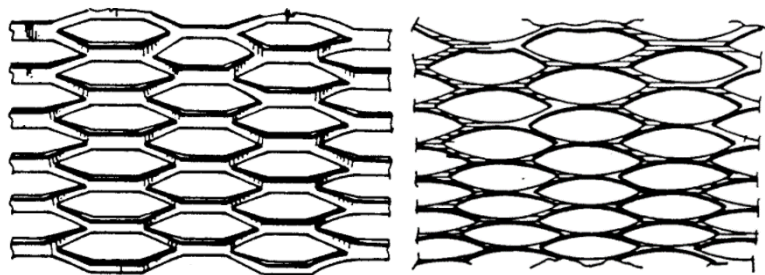


Figura 2.9 - Folhas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989).

Neste conceito, as aberturas das laminas são orientadas com as lâminas dirigidas para cima e para a frente em cada folha, como se pode observar na Figura 2.10.

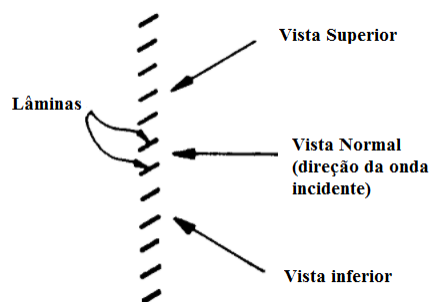


Figura 2.10 - Orientação das lâminas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989).

Os elementos de absorção formados então por uma pluralidade de folhas de metal distendido não nivelado são posicionados paralelamente na estrutura dissipadora, espaçados entre os elementos sucessivos decrescendo de barlamar para sotamar da estrutura, bem com a sua porosidade.

Os elementos testados são essencialmente verticais, no entanto foram realizados outros estudos com outras disposições e combinações. Na Figura 2.11(a), pode-se verificar uma configuração em que os elementos constituído por várias folhas de metal estão dispostos em formação ziguezague. Na Figura 2.11(b) um configuração com uma cobertura de natureza parabólica e por fim na Figura 2.11(c) uma combinação de elementos dispostos na vertical com elementos colocados com uma determinada inclinação, outras disposições foram realizadas e podem ser consultadas em Ploeg e Jamieson, 1989.

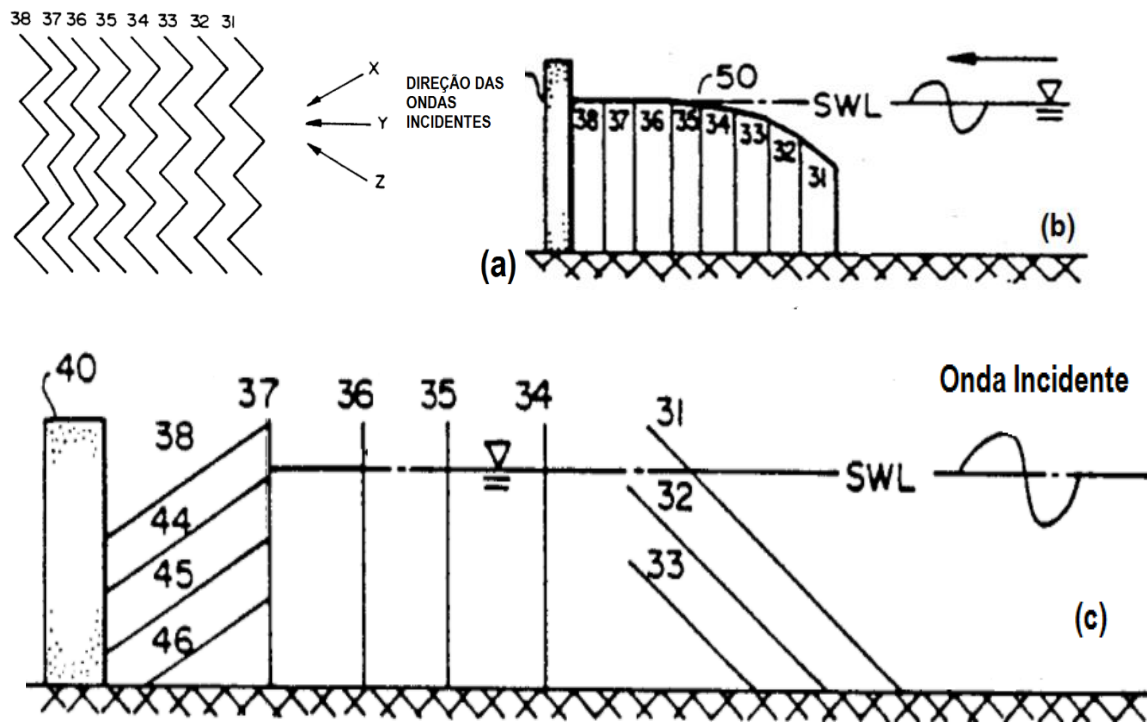


Figura 2.11 - Várias disposições para os elementos de folhas de metal expandido não nivelado (Ploeg e Jamieson, 1989).

Os resultados dos ensaios efetuados por Ploeg e Jamieson, 1989 concluíram que:

- a quantidade de dissipação de energia depende da localização de cada elemento em relação às localizações dos nodos e antinodos do sistema de ondas estacionário instalado na estrutura absorvedora;
- não se deve colocar os elementos de baixa porosidade muito próximos dos antinodos de uma parede impermeável, mas sim nas vizinhanças dos nodos, aproximadamente a um quarto do comprimento de onda na frente da parede impermeável;
- o espaçamento entre e atrás de elementos de maior porosidade tem que ser maior do que o espaçamento, entre e atrás de elementos de menos porosidade;
- A distância desejável da estrutura de barlar para sotmaar ser de cerca de $0.35L_{máx}$ a $1.0L_{máx}$, sendo $L_{máx}$ o comprimento de onda mais longo que deve ser absorvido no tanque;
- Os elementos de absorção de metal distendido não nivelado conferiu grande flexibilidade à estrutura dissipadora;
- É uma solução particularmente adequada para fins laboratoriais onde pode ser construído em módulos que podem ser facilmente movidos;

- É forte, longa durabilidade, leve, portátil e limpo comparado com praias de pedra que mantem as mesmas características por um longo tempo;
- Produz níveis de absorção bastantes eficientes, principalmente quando as aberturas das laminas das folhas de metal estão orientadas para cima e para a frente na direção da propagação das ondas incidentes.

Muitos outros autores, que serão apresentados de seguida, seguiram este princípio de absorvedor de ondas progressivas. De seguida apresenta-se resumidamente outros estudos efetuados.

Goda e Ippen (1963) analisaram dissipadores de ondas que consistem em placas verticais de redes metálicas alinhadas perpendicularmente à direção da propagação da onda. Foram testadas quatro configurações em condições de águas profundas ($d \geq \frac{L}{2}$) e os resultados satisfatórios. Mostraram também que a reflexão depende mais do espaçamento entre placas, do que do número de placas utilizado, desde que o número de placas seja razoavelmente elevado.

Lean (1967) apresentou uma teoria simplificada para prever o comportamento à reflexão de dissipadores de ondas permeáveis de forma mais simples, feito por material poroso e homogéneo. O método considerou a teoria linear das ondas longas.

Lean estudou dissipadores apoiados em paredes verticais impermeáveis, com inclinações uniformes e inclinações parabólicas. Constatou que podem ser obtidas reflexões baixas se o dissipador de material poroso for posicionado ao longo de um fundo com inclinação uniforme ou parabólica. Lean recomendou que o comprimento do dissipador deveria ser pelo menos 75% do comprimento de onda incidente para se obterem coeficientes de reflexão inferiores a 10%.

Madsen (1983) desenvolveu uma solução analítica para a reflexão da onda com uma incidência normal em águas pouco profundas ($d \leq \frac{L}{20}$) através de um dissipador vertical poroso, situado à frente de uma parede vertical e sobre um fundo plano. Supõe-se que o dissipador é homogéneo e de forma retangular.

Jamieson, et al. (1989) aplicaram uma configuração semelhante às placas perfuradas de metal distendido para dissipar a energia das ondas. Este tipo de absorção é necessário se as ondas incidentes forem refletidas para as paredes laterais do tanque de ondas. Três filas de placas perfuradas verticais foram testadas para agitação regular e irregular. Estes autores chegaram à conclusão que essa configuração é especialmente favorável para tanques multidirecionais. Jamieson et al. (1989) concluíram que esta configuração era particularmente adequada para tanques de ondas multidirecionais porque uma parte da energia da onda incidente era direcionada para as paredes laterais. No entanto, seria necessário, neste caso, otimizar as placas perfuradas de forma a minimizar as reflexões.

Terrett et al. (1986) investigaram o efeito de amortecimento da onda por uma parede porosa usando a teoria das ondas longas. É indicado que a estrutura atinge o amortecimento máximo da onda se o comprimento da câmara B e o comprimento de onda L estiverem relacionados para um valor $B=L$ ($m/4$) para $m = 1,3,5, \dots$ e perde completamente a eficiência de amortecimento da onda para $m = 2,4,6, \dots$

Twu e Lin (1991) realizaram investigações sobre um absorvedor de ondas bastante eficaz, contendo um número finito de placas porosas. Mostrou-se que a reflexão da onda pelo absorvedor era significativamente afetada pelo espaçamento entre as placas porosas adjacentes, bem como pelo alinhamento destas placas. Estes autores concluíram que para ondas incidentes na faixa de $\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$, era apropriado manter o espaçamento entre as placas porosas adjacentes e entre o último e a parede final com um valor de 0.88 vezes a profundidade de água. Ainda salientou que o absorvedor de ondas seria mais eficiente se as magnitudes de porosidade das placas estivessem organizadas decrescendo progressivamente de barlar para sotamar.

Twu e Liu (1999) desenvolveram uma teoria para estimar a reflexão da onda em estruturas inclinadas. Na derivação teórica, uma parede sólida inclinada foi simulada por uma escada. Cada vão de escada elevava uma onda sub-refletida. A soma de todas as ondas sub-refletidas de todos os vãos de escada eram então equiparados à onda real refletida da parede inclinada. Os dados medidos foram comparados com esta teoria e foi considerada satisfatória.

Klinghammer (2010) realizou um estudo na instalação CCOB (Cantabria Coastal and Ocean Basin) de modo a otimizar os dissipadores passivos existentes no tanque multidirecional. O desenho preliminar efetuado dispunha de três dissipadores passivos nos contornos do tanque (Figura 2.12). Usou placas perfuradas, cuja utilização já se mostrou ser muito frequente noutros laboratórios e mostrou ser eficiente. Realizando outras propostas de modo a otimizar o espaço e determinar a eficiência do sistema proposto.

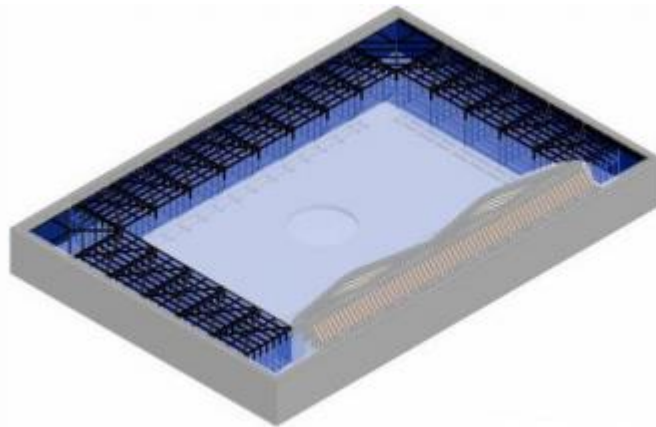


Figura 2.12 - Dissipadores de ondas passivo nos contornos do tanque CCOB (Klinghammer, 2010).

Este autor refere que para o vasto intervalo das suas aplicações (estudo da hidrodinâmica da zona costeira; erosão costeira; análise de novas tecnologias submarinas; plataformas; eólicas offshore, entre outros no âmbito da engenharia marítima) e condições experimentais associadas, explica a dificuldade de se chegar a um bom dimensionamento de um sistema dissipativo das ondas incidentes. Ao mesmo tempo estas aplicações requerem um espaço útil no tanque para a realização de um dissipador flexível.

Este autor realizou uma configuração em “V” com duas placas verticais (Fig.2.14), este representa uma alteração do conceito básico do funcionamento de dissipadores com placas perfuradas. Cada frente pode ser analisada como uma placa recebendo a onda oblíqua.

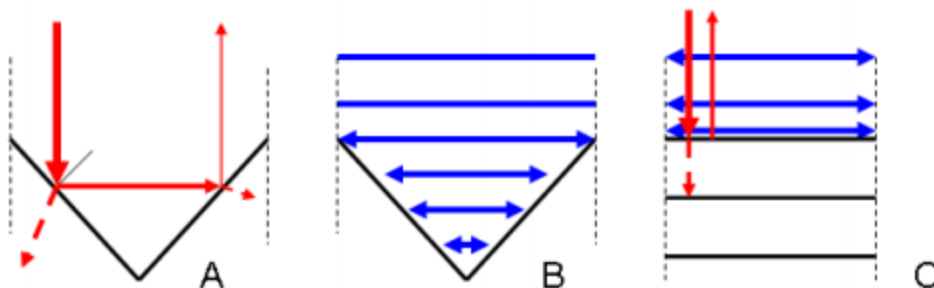


Figura 2.13 - Diferenças entre a configuração em "v" com a configuração das placas verticais perfuradas, Klinghammer (2010).

Na Figura 2.13 são indicadas as diferenças de desempenho de um dissipador em “V” em comparação com um dissipador com placas verticais paralelas. Enquanto que no segundo caso (Fig. 2.13c) se verifica que a onda atinge em todo o seu comprimento ao mesmo tempo a placa, na Figura (2.13a e 2.13b) pode-se observar que a onda atinge a placa em vários instantes pelo que dissipa maior energia, refletindo e transmitindo a onda para outra direção. No entanto esta configuração em “V” tem como desvantagem o espaço que ocupa por cada linha de placas colocadas, mas pode trazer algumas vantagens para o dissipador de ondas na extremidade oposta do sistema de geração.

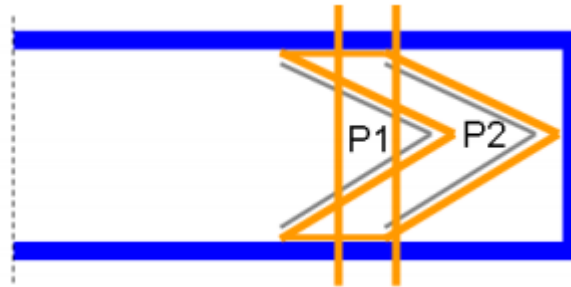


Figura 2.14 - Configuração 1, Klinghammer (2010).

Outra configuração proposta, resultou da combinação da configuração anterior (Fig.2.15) com mais 4 placas verticais (P1=36%; P2=23.33%; P3=23.30%; P4=15%; P5=10% e P6=10%)

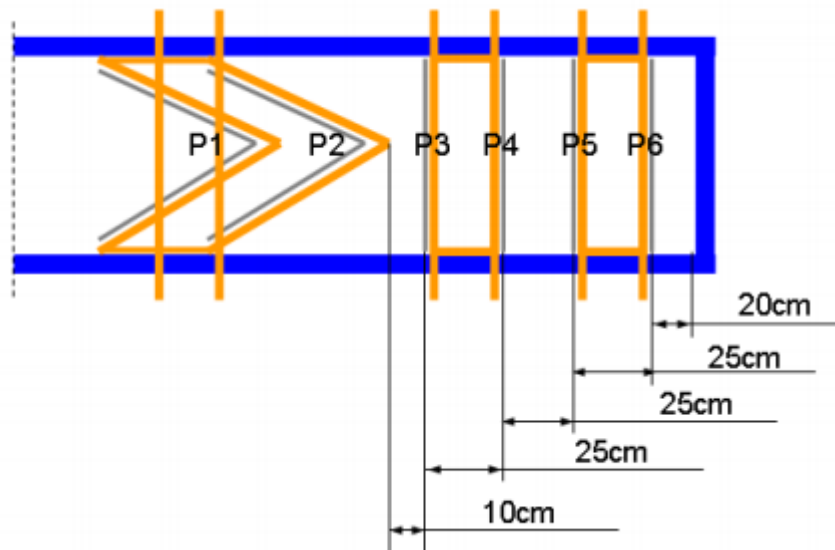


Figura 2.15 - Configuração 2, Klinghammer (2010).

Nos resultados da análise da reflexão para estas configurações (Figura 2.14 e 2.15) vê-se que a influência principal para coeficientes de reflexão menores tem-se para comprimentos dos dissipadores maiores, comprovando a teoria que relaciona o rendimento do dissipador com a relação do comprimento do dissipador e o comprimento da onda incidente. A combinação da Fig.2.15, foi de longe a que obteve melhores resultados na ordem dos 10 a 30%.

No tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, que poder-se-á verificar um pouco mais à frente neste documento, é utilizada uma praia de enrocamento com 8m de desenvolvimento e com

inclinação suave, as ondas incidentes rebentam no talude permitindo a percolação da água através das rochas e por sua vez a dissipação de energia minimizando o efeito da reflexão. Alguns ensaios preliminares permitiram obter coeficientes de reflexão para a praia entre 10% a 20%.

2.5.2. DISSIPADORES ATIVOS

Os dissipadores de onda ativos, são dispositivos mecânicos que se movem em resposta às ondas incidentes para absorver a sua energia (Hughes, 1993). Um tipo de dissipador ativo é semelhante a um gerador de ondas (tipo pá batidora), mas localizado na extremidade oposta do tanque de ondas para absorver as ondas progressivas que aí chegam. Quando a onda alcança o dissipador, a pá move-se para a absorver completamente.

A teoria das ondas de 1ª ordem pode ser usada para determinar o movimento da pá necessário para absorver essas ondas regulares progressivas (Dean e Dalrymple 1984). No entanto a absorção dificilmente é total, pelo que requer, em geral, um sistema de medida e resposta de controlo ativo.

Milgram (1970) foi o primeiro a usar uma pá, tipo flap para absorver ondas de pequena declividade num tanque de ondas. Ele utilizou um sensor de nível instalado na face da pá batidora para medir as flutuações da superfície livre das ondas incidentes e para proporcionar um sinal para um sistema ativo controlando o flap. O coeficiente de reflexão obtido foi inferior que 11% na faixa de frequências de 0,5 a 2 Hz.

O segundo tipo de dissipação ativa tem lugar nas próprias pás do sistema de geração de ondas e funcionam em simultâneo com a geração das ondas.

Bullock e Murton (1989) descrevem um sistema de absorção ativa num canal utilizando também um sensor de nível como realimentação hidrodinâmica.

Kawaguchi (1986) sugeriu o sistema de absorção com realimentação pelo registo do nível da superfície de água por um sensor unido ao sistema de geração, comandado pela velocidade, pois possui a mesma fase da onda progressiva gerada.

Ikeya (1991) utilizou o mesmo procedimento do autor anterior, chegando a um meio de obter uma correção do sinal de comando, para ondas oblíquas em torno de uma direção principal, através da leitura do sensor de nível do gerador e mais um sensor em cada lado dos geradores adjacentes. Não foram apresentados resultados, nem coeficientes de reflexão esperados no seu trabalho.

Schäffer e Skourup (1996) e Schäffer (2001) desenvolveram um sistema de controle de absorção de ondas multidirecionais que considera o efeito das ondas evanescentes. O controlador é baseado numa função de transferência que relaciona o sinal de comando da posição do gerador e a leitura dos sensores de nível, realizada no tempo através de um filtro digital recursivo. O método foi testado num tanque numérico, obtendo uma melhoria significativa do desempenho na absorção das ondas.

No Japão já existem tanques de ondas equipados em todo o seu contorno por sistemas de geração com absorção ativa (Carneiro, 2012). Um dos tanques que existe pertence ao *National Maritime Research Institute* (NMRI), centro de pesquisa sediado em Tóquio. O tanque propriamente dito denomina-se *Deep Sea Basin*, foi inaugurado em 2002, tem um formato circular e está cercado por 128 geraodres de onda tipo flap (Fig.2.16). Este tanque foi desenvolvido para simular o comportamento do mar em águas profundas.



Figura 2.16 - Deep Sea Basin do NMRI.

No Laboratório de hidráulica da FEUP, o sistema de absorção ativo está incorporado no sistema de geração de ondas. Este sistema tem como objetivo evitar que as ondas refletidas pela praia dissipadora, pelo modelo físico e pelas paredes do tanque, e que se propagam em direção ao sistema de geração, sejam refletidas, de novo, nas pás desse sistema originando a re-reflexão das ondas geradas inicialmente. Quando o sistema de absorção ativo é acionado no sistema de controlo das pás, a onda a ser gerada deve corresponder à diferença entre a onda pedida e a onda refletida, corrigindo a onda que é gerada que será aproximadamente a onda que é pedida.

3

SOLUÇÕES PROPOSTAS PARA CONTROLO DE REFLEXÕES EM LABORATÓRIO

3.1. BREVE INTRODUÇÃO

Sendo o objetivo desta dissertação avaliar a eficiência de estruturas dissipadoras da energia das ondas que ocupem um espaço útil, dentro da instalação experimental, menor que as soluções tradicionais, e que conduzam a baixos coeficientes de reflexão, foram tidas em conta algumas considerações e conclusões que se retiraram dos estudos enunciados no capítulo anterior, para servirem como base no desenvolvimento deste trabalho, tais como:

- Quanto maior a gama de alturas e períodos de onda que devem ser atenuados, maior o numero de elementos de porosidade variáveis serão necessários;
- As grelhas verticais de metal distendido devem estar alinhadas perpendicularmente à direção da propagação da onda e devem ser colocadas de modo a que a porosidade seja decrescente no sentido da propagação da onda, ou seja, de barlar para sotamar;
- As placas com porosidades mais elevadas funcionam melhor para absorver a energia das ondas com pequena declividade. As placas com porosidades baixas funcionam melhor para absorver a energia das ondas com declividade elevada;
- As grelhas verticais de metal distendido devem ser posicionadas na vizinhança dos nodos do sistema quase estacionário que se desenvolve no interior da estrutura dissipadora;
- As grelhas horizontais de metal distendido devem estar posicionados na vizinhança dos antinodos do sistema quase estacionário que se desenvolve;
- O comprimento do dissipador de onda com placas perfuradas deve estar compreendido entre $0,35L_{máx}$ e do comprimento de onda máximo, embora Lean (1967) tenha referido que para se obterem coeficientes de reflexão inferiores a 10% era necessário que o comprimento do dissipador fosse de pelo menos $0,75L$;
- Se for necessário obter coeficientes de reflexão baixos para uma vasta gama de declividades da onda (incluindo declividades inferiores a 0,02 e superiores a 0,07), é necessário usar uma estrutura com um comprimento maior do que $0,35L_{máx}$ para acomodar mais elementos de porosidade adequada;

- À medida que a altura de onda e os correspondentes deslocamentos horizontais devidas ao movimento das partículas de água, diminuem com a distancia do dissipador, são utilizados espaçamentos mais próximos dos elementos, para otimizar a dissipação de energia pelo aumento da turbulência dos elementos adicionais;
- As ondas devem ter espaço suficiente para que ocorra dissipação de energia por turbulência antes que outro elemento seja encontrado. Ou seja, na frente da estrutura, onde as porosidades são maiores, deve haver espaçamentos maiores entre os elementos de absorção, para permitir que essa turbulência exista, caso contrário ocorrerá maior reflexão da energia da onda incidente.

3.2. MODELO

3.2.1. DIMENSÕES

O comprimento que o sistema de dissipação da agitação incidente deve ter, está diretamente relacionado com o comprimento de onda e a declividade da onda. É sabido por estudos efetuados ao longo do tempo, que o comprimento do dissipador deve estar, pelo menos, compreendido entre $0.35L_{máx}$ e $L_{máx}$, sendo que $L_{máx}$ correspondente ao comprimento de onda máximo, caso contrário poderão ocorrer reflexões muito elevadas. Quando o comprimento da estrutura, B, excede o comprimento de onda (isto é quando $B/L > 1$), o coeficiente de reflexão reduz-se significativamente. Porém na presente dissertação procura-se dimensionar uma estrutura que optimize o espaço útil do tanque de ondas da FEUP, pelo que adoptar o comprimento igual ao comprimento de onda máximo, não seja o mais favorável.

Na Tabela 3.1, estão apresentadas para duas profundidades e para um dado intervalo de períodos de onda, as declividades calculadas, bem como os comprimentos de onda. Para se obter coeficientes de reflexão mais baixos numa vasta gama de declividades incluindo valores inferiores a 0,02 e 0,07 é necessário um comprimento da estrutura superior ao valor mínimo de $0.35L_{máx}$, de modo a acomodar mais elementos de porosidade adequada dispostos dentro da estrutura dissipadora.

Na fase de pré-dimensionamento, para calcular o comprimento de onda para as condições definidas, foi usada a seguinte expressão,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \times \tan\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (3.1)$$

em que L representa o comprimento de onda, g a aceleração gravítica, T o período da onda (período de onda de pico para os testes com ondas irregulares), e d a profundidade de água.

Tabela 3.1 - Comprimento total da estrutura relativamente ao comprimento de onda.

T (s)	L (m)		H/L, H=0.04m		H/L, H=0.08m		0.35L (m)	
	d=0.30m	d=0.50m	d=0.30m	d=0.50m	d=0.30m	d=0.50m	d=0.30m	d=0.50m
1.5	2.34	2.83	0.017	0.014	0.034	0.028	0.82	0.99
2	3.26	4.06	0.012	0.010	0.025	0.020	1.14	1.42
2.5	4.15	5.24	0.010	0.008	0.019	0.015	1.45	1.83
3	5.03	6.40	0.008	0.006	0.016	0.013	1.76	2.24

Para esta gama de períodos, e sabendo que o comprimento da estrutura deveria ser pelo menos igual a 35% do comprimento de onda máximo, definiu-se que a estrutura deveria ter um comprimento de 3 m,

garantindo-se assim que para as condições de agitação que se pretendia testar, haveria folga suficiente para a onda dissipar a energia e também folga suficiente para colocar mais placas se necessário.

Para a estrutura dissipadora adotou-se uma largura de 0.80 m que será a mesma da largura do canal onde irão decorrer os ensaios e uma altura de 0.75 m, de forma a existir alguma folga de segurança relativamente à ocorrência de galgamentos.

Na Figura 3.1 pode-se observar um esboço da estrutura a testar em três dimensões, com as dimensões estipuladas. Na configuração final, o esqueleto foi equipado com peças que permitem dar suporte aos elementos verticais e horizontais a colocar no seu interior, para dissipação da energia das ondas.

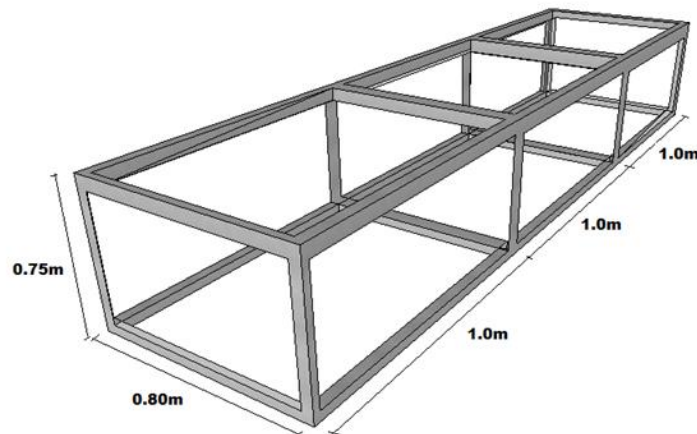


Figura 3.1 - Esboço 3D do esqueleto da estrutura dissipadora

3.2.2. MATERIAIS

3.2.2.1. Metal distendido

Um dos materiais utilizados no desenvolvimento desta dissertação foram as grelhas de metal distendido. Estas grelhas têm um amplo campo de aplicação em obras de arquitetura e engenharia, desde pavimentos, tetos falsos, entre outros. É um material económico para utilizar numa estrutura com as características da que se quer dimensionar devido a variedade de porosidades e formas disponíveis.

Este material possui vários tipos de malhas que podem ser de malha quadrada, losangular, hexagonal, decorativa ou redonda, disponíveis no mercado e de fácil acesso. Possuindo diferenças nas suas dimensões da abertura, espessura e peso.

Na Figura 3.2 pode-se observar algumas grelhas de metal distendido semelhantes às que usamos nos ensaios experimentais.

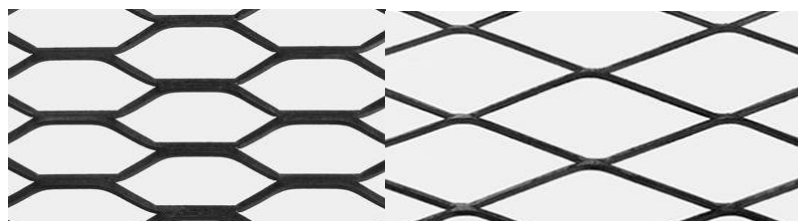


Figura 3.2 - Exemplo de malhas de metal distendido, à esquerda, da forma losangular e à direita da forma hexagonal.

A porosidade dos elementos de metal distendido a usar na avaliação experimental, foi estimada com recurso à ferramenta AutoCad, usando o comando AREA e a seguinte fórmula,

$$Porosidade [\%] = \frac{\text{Área de uma abertura} \times n^{\circ} \text{ Aberturas}}{\text{Área Total}} \quad (3.2)$$

Na Tabela 3.2 e 3.3 estão detalhadas as porosidades das grelhas utilizadas nestes ensaios, ainda que não seja suficiente para caracterizar a transmissão e reflexão das placas.

Tabela 3.2 - Porosidade das Placas de metal distendido

Nome da Grelha	Quantidade	Porosidade [%]
Espinhaço 20/25	1	21.8
Gradil Favo de Abelha 14/30	2	41.4
Gradil esteira 11/40	1	17.2
Espinhelinha 20/25	1	19.4
FO 20/20	1	9.94
Gradil 14/30	1	37.38

3.2.3. ELEMENTOS FLUTUANTES

Como alternativa à aplicação de placas de metal distendido foram utilizados elementos cilíndricos de cortiça como elemento flutuante, Fig.3.3. É um material fácil de obter, o que, do ponto de vista económico é uma mais valia para o objetivo pretendido. É natural, versátil e sustentável. Este material apresenta ainda algumas propriedades que poderão ser interessantes como:

- Quando sofre impacto, tem uma grande capacidade de absorção de energia;
- Material que não se estraga por ter elementos que são resistentes à humidade como suberina (substância hidrofóbica);
- Mais de 50% do seu volume é ar, o que a torna muito leve - pesa apenas 0.16 gr por centímetro cúbico e por isso flutua.



Figura 3.3 - Amostra do elemento flutuante utilizado no ensaio

Assim como o metal distendido, este material é aplicado em vários segmentos do setor industrial deste automóvel, bebidas, construção, alvenaria, decoração, calçado, entre outros. Utilizada também em revestimento de solos, isolamentos térmicos e acústicos.

A definição do volume necessário desses elementos flutuantes, baseou-se numa estimativa admitindo uma extensão para a câmara onde seriam instalados. Admitiu-se que a extensão da câmara seria 0.75 m e que a profundidade submersa das “rolhas” seria de 0.05 m e que estas iriam ocupar todo o volume até ao topo da estrutura, obtendo-se um valor aproximado de 300L (aproximadamente três sacos de 100L, cada). No decorrer dos ensaios verificou-se a necessidade de avaliar a eficácia de configurações da estrutura com diferentes quantidades deste material flutuante, ou seja com diferentes profundidades submersas da camada flutuantes para avaliar a influência desse parâmetro no comportamento à reflexão da estrutura dissipadora.

O funcionamento desta camada proporciona uma grande dissipação da energia das ondas, uma vez que a realiza por duas maneiras. Por um lado quando a onda incide na frente da camada, esta devido à sua rugosidade e porosidade permite a percolação da água, criando um movimento oscilatório que acompanha o movimento da onda. Por outro, parte da onda incide na superfície da camada, havendo rebentação e espraio. Na Fig. 3.4, pode-se observar um esboço da explicação que aqui está descrita.

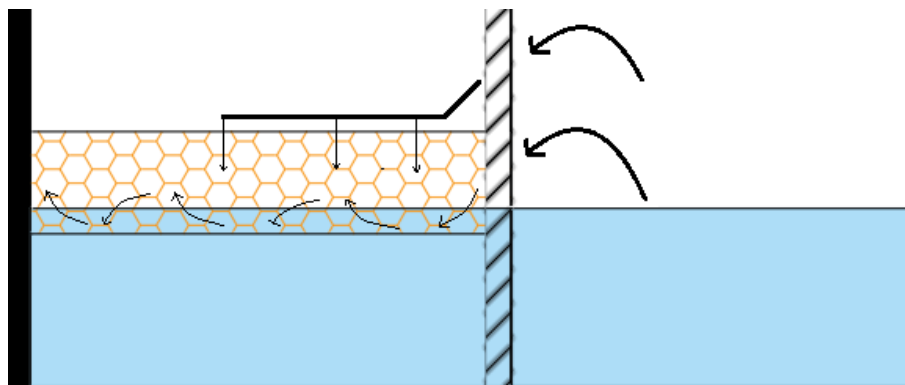


Figura 3.4 - Funcionamento da camada de elementos flutuantes limitada por uma parede impermeável e uma grelha de metal distendido

3.3. CONFIGURAÇÕES A TESTAR EM LABORATÓRIO.

3.3.1. GRELHAS DE METAL DISTENDIDO

3.3.1.1. Posicionamento das aberturas das grelhas de metal distendido.

As grelhas de metal distendido, quando colocados na estrutura, dissipam a energia da onda por atrito e turbulência. No entanto, é necessário, antes de colocar as grelhas na estrutura base, tomar a devida atenção, para que as aberturas das placas fiquem bem dirigidas. Para se obter uma eficácia maior na dissipação da energia deve-se colocar as aberturas dirigidas para cima, de frente para o sistema de geração, tal como se exemplifica na Fig.3.5.

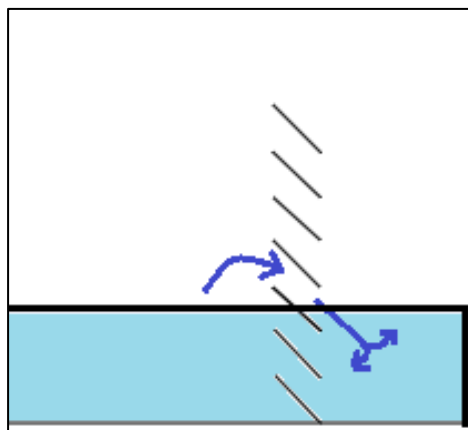


Figura 3.5 - Funcionamento da dissipação da energia devida à agitação.

3.3.1.2. Definição do posicionamento das placas de Metal Distendido

Como já foi referido, num canal de ondas, em caso de agitação regular, as ondas incidentes e refletidas geram um sistema quase estacionário, composto por uma série de nodos e antinodos. Este sistema apresenta velocidades horizontais e verticais diferentes das que ocorrem em ondas progressivas. Na agitação irregular, como é equivalente a um sistema de ondas regulares com diferentes períodos e alturas de onda, torna-se mais complicado definir a posição dos nodos e antinodos.

No início deste capítulo foi referido que as placas verticais deveriam estar localizadas nos nodos de um sistema estacionário ou na sua vizinhança, com o objetivo de dissipar a maior parte da energia da onda. O movimento vertical nos antinodos, justifica a aplicação de placas horizontais adicionais para aumentar a eficácia dos dissipadores.

As posições dos nodos e antinodos para as condições de onda definidas no âmbito deste trabalho, usando as expressões 2.13 e 2.14, são apresentadas na Tabela 3.3 e 3.4 para as profundidades de água de 0,30 m e 0,50 m, respetivamente. O parâmetro n representa a posição em que a placa se encontra inserida na estrutura. Assim, para $n=0$, a placa está na posição mais a sotamar da estrutura, seguindo a numeração até à zona mais a barlar da estrutura.

Tabela 3.3 - Posição dos nodos e antinodos para uma profundidade de água de 0,30 m.

T [s]	1.5		2		2.5		3	
n	Xn	Xan	Xn	Xan	Xn	Xan	Xn	Xan
0	0.59	0.00	0.81	0.00	1.04	0.00	1.26	0.00
1	1.76	1.17	2.44	1.63	3.11	2.08	3.77	2.52
2	2.93	2.34	4.07	3.26	5.19	4.15	6.29	5.03
3	4.10	3.51	5.70	4.89	7.26	6.23	8.80	7.55
4	5.27	4.68	7.33	6.52	9.34	8.30	11.32	10.06

Tabela 3.4 - Posição dos nodos e antinodos para uma profundidade de água de 0.50 m

T [s]	1.5		2		2.5		3	
n	Xn	Xan	Xn	Xan	Xn	Xan	Xn	Xan
0	0.71	0.00	1.01	0.00	1.31	0.00	1.60	0.00
1	2.12	1.41	3.04	2.03	3.93	2.62	4.80	3.20
2	3.53	2.83	5.07	4.06	6.55	5.24	7.99	6.40
3	4.95	4.24	7.10	6.08	9.17	7.86	11.19	9.59
4	6.36	5.65	9.13	8.11	11.79	10.48	14.39	12.79

Como já foi referido nesta dissertação, as posições dos nodos e antinodos dependem do comprimento de onda, que depende da profundidade de água. Os valores a cinzento não foram considerados, pois apenas interessa ter em consideração, os pontos posicionados no comprimento da estrutura dissipadora. Os valores obtidos para os nodos variam entre 0 e 2.93 m e para os antinodos variam entre 0 e 2.83 m. Como no laboratório os modelos físicos estão sujeitos a várias condições de agitação, e essas condições variam de estudo para estudo, esta teoria não se pode aplicar diretamente. A variação das posições do sistema de nodos e anti-nodos para cada onda é muito elevada pelo que se torna um desafio determinar um valor fixo para a colocação das grelhas. Uma forma de contornar o problema é fazer a colocação das grelhas verticais numa posição que esteja dentro desse intervalo, respeitando o que foi acima referido.

3.3.1.3. Soluções com grelhas de metal distendido

As soluções testadas na fase experimental foram idealizadas com base nos critérios anteriormente apresentados. Sempre que necessário, essa dissipação era modificada com base nos resultados obtidos após alguns ensaios.

Na configuração 1 foram utilizadas cinco grelhas verticais organizadas na estrutura com as porosidades e respetivos espaçamentos a decrescer no sentido de barlar para sotamar da estrutura. Na Figura 3.5 e na Tabela 3.6 estão ilustradas e detalhados os espaçamentos e respetivas porosidades para esta configuração.

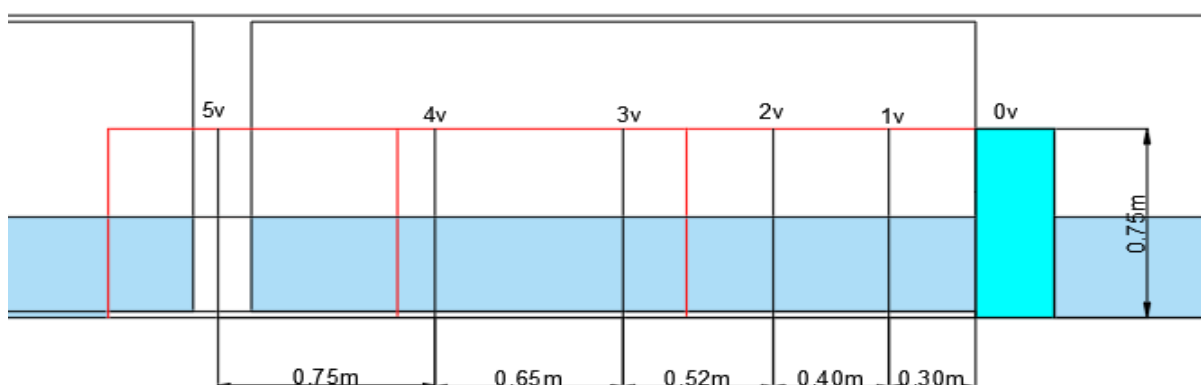


Figura 3.6 - Corte da estrutura (a vermelho) que mostra a disposição das grelhas para a configuração 1, usando metal distendido

Tabela 3.5 - Espaçamentos e porosidades das grelhas verticais utilizadas para a configuração 1.

N.º	Designação	Porosidade	s [m]
0v	Placa Opaca	0%	0.30
1v	Gradil Esteira 11/40	17.20%	0.40
2v	Espinhaço	21.78%	0.52
3v	Gradil 14/30	37.38%	0.65
4v	Gradil Favo de Abelha 14/30	41.38%	0.75
5v	Gradil Favo de Abelha 14/30	41.38%	

Na configuração 2 manteve-se a tipologia semelhante à da configuração anterior. Foi adicionada uma grelha vertical e diminuíram-se os espaçamentos entre as grelhas dispostas a sotamar da estrutura, de modo a avaliar a influência que estes dois fatores têm no comportamento da estrutura à reflexão. Na Figura 3.6 apresenta-se um corte do canal com as grelhas dispostas na estrutura base. Os espaçamentos e as porosidades são apresentadas na Tabela 3.7.

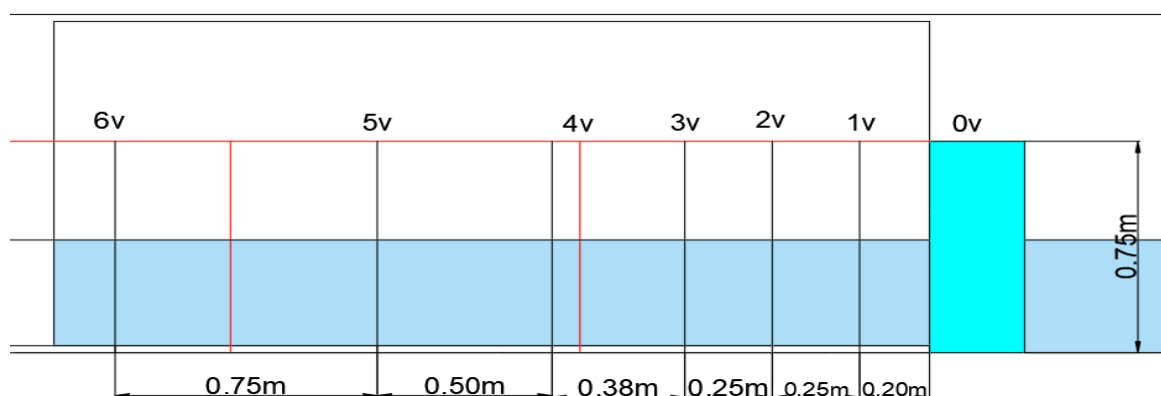


Figura 3.7 - Corte com a disposição das grelhas na estrutura para a configuração 2.

Tabela 3.6 - Espaçamentos e Porosidades das grelhas verticais utilizadas para a configuração 2.

N.º	Designação	Porosidade	s [m]
0v	Placa Opaca	0%	0.20
1v	FO 20/20	9.94%	0.25
2v	Gradil Esteira 11/40	17%	0.25
3v	Espinhelinha	19.42%	0.38
4v	Espinhaço	21.78%	0.50
5v	Gradil 14/30	37.38%	0.75
6v	Gradil Favo de Abelha 14/30	41.38%	

3.3.2. ELEMENTOS FLUTUANTES

3.3.2.1. Soluções Simples

Para a solução usando os elementos flutuantes foram consideradas 5 configurações. A primeira configuração consiste numa câmara simples (com 1.50 m de comprimento) onde serão depositados cerca de 300L de elementos flutuantes (rolhas), que corresponde a totalidade do valor disponibilizado. Esta câmara está limitada por uma grelha de metal distendida, de porosidade 19.42% de forma a não permitir a passagem dos elementos flutuantes para o canal onde estão colocados os equipamentos de medição, e também para contribuir na dissipação da energia incidente, e pela placa vertical opaca, existente no tardoz da estrutura. Foram ainda colocadas em cima da estrutura umas placas com pesos, de modo a evitar que a camada ao sofrer oscilação das ondas não permitisse que as ondas saíssem pela superfície. Na Figura 3.7 pode-se observar a estrutura dissipadora instalada no canal, bem como os pesos colocados em cima da mesma. O traço a cheio, a vermelho representa o nível médio de água e ds, a profundidade submersa da camada de rolhas.



Figura 3.8 - Configuração 1 instalada no canal (à esquerda), suportes colocados sobre a estrutura, (à direita).

Após os resultados obtidos para esta configuração 1, a câmara manteve-se, retirando-se o excesso de quantidade de elementos flutuantes colocados anteriormente, de modo a verificar a influência que a quantidade tinha nos resultados. A quantidade utilizada foi cerca de metade da anterior para a configuração ilustrada na Figura 3.8.



Figura 3.9 - Configuração 2 instalada no canal do ensaio.

3.3.2.2. Soluções Mistas

Nas configuração 3 e 4, usou-se uma combinação de câmaras com as grelhas verticais de metal distendido. A câmara de elementos flutuante situada na parte traseira da estrutura tinha 0.75 m de comprimento e estava preenchida com 2 sacos de 100L cada (para a configuração 3) e para a configuração 4 o equivalente a meio saco de rolhas. Para delimitar a câmara usou-se uma grelha de porosidade menor 9.94%, seguindo-se mais 5 grelhas verticais, perfazendo 6 grelhas no total. Na Tabela 3.7 estão detalhadas as porosidades e os espaçamentos entre grelhas para estas configurações.

Nas Figuras 3.9 e 3.10, estão apresentadas as configurações 3 e 4. Nestas configurações foram colocadas por cima da camada de elementos flutuantes placas de contraplacado e 6 blocos de 2,5kg (valor resultante da medição em laboratório) para conferir um peso adicional ao conjunto e de forma a mergulhar um pouco mais a camada de elementos flutuantes, procurando-se assim a dissipação da energia das ondas. Ao fazer estes ajustes, teve-se o cuidado de assegurar que a camada acompanhava o movimento oscilatório da onda.

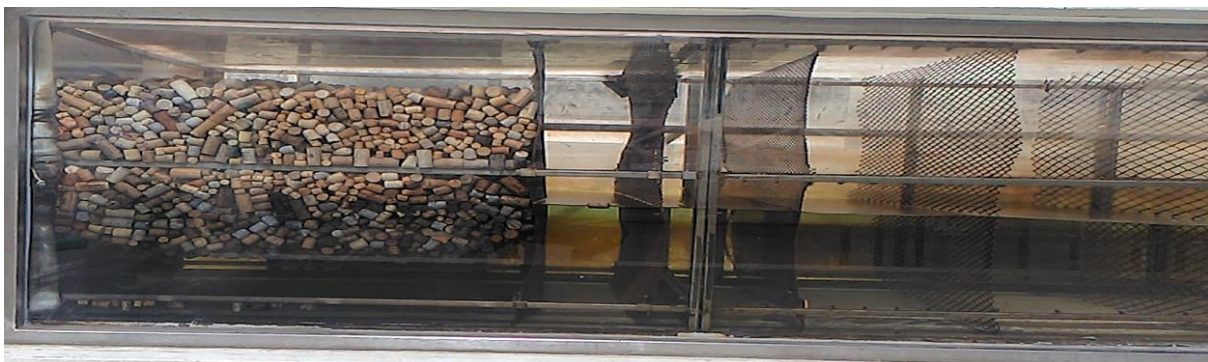


Figura 3.10 - Combinação das grelhas verticais com os elementos flutuantes, configuração 3.



Figura 3.11 - Combinação de grelhas verticais com os elementos flutuantes, adicionando um suporte de peso, configuração 4.

Tabela 3.7 - Porosidades e espaçamentos utilizados para as configurações 3 e 4.

N.º	Designação	Porosidade [%]	s (m)
0v	Placa de Acrílico	0.00	0.75
1v	FO 20/20	9.94	0.20
2v	Gradil 11/40	17.00	0.25
3v	Espinhelinha	19.42	0.30
4v	Espinhaço	21.78	0.40
5v	Gradil 14/30	37.38	0.50
6v	Gradil Favo de Abelha 14/30	41.38	

Na configuração 5, a posição das grelhas verticais foi mantida, sendo que apenas se alterou a posição da câmara com os elementos flutuantes. A câmara passa de sotamar para barlar da estrutura. O comprimento da câmara reduz-se de 0.75 m para 0.50 m e desta vez está limitado por duas grelhas verticais de porosidades diferentes (37.38% e 41.38%, a sotamar e barlar, respetivamente). Na Fig. 3.13, pode-se observar a configuração 5 instalada no canal, para uma profundidade de 0.30 m, para uma altura de onda de 4cm e um período de 2s.

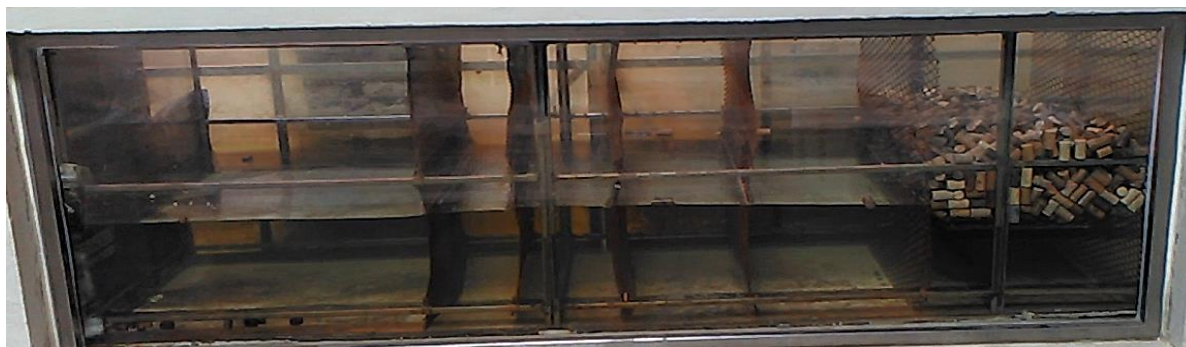


Figura 3.12 - Configuração 5, câmara de rolhas colocada na frente da estrutura

Outras soluções foram discutidas, no entanto não foram efetuadas no presente trabalho por limitações do tempo para a execução da dissertação e de disponibilidade do laboratório para a realização dos ensaios. No entanto serão discutidas algumas soluções interessantes, no capítulo 5, a serem desenvolvidas num estudo futuro.

4

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL 2D E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. ENQUADRAMENTO

Os problemas de reflexão existentes em laboratório devem-se na prática essencialmente aos efeitos laboratoriais. Estes comparativamente com os efeitos de escala, não dependem da escala geométrica do modelo físico construído no interior do tanque de ondas. Esses efeitos resultam, sobretudo, da incapacidade de reproduzir com rigor as condições de agitação marítima.

As paredes laterais do tanque de ondas impõem fronteiras que não têm equivalência directa no protótipo. Por outro lado, o sistema de geração pode constituir, em si mesmo, uma fronteira refletora. A agitação que se propaga em direcção à costa, depois de reflectida, segue caminho em direcção ao largo, no entanto no modelo físico, as pás do sistema de geração podem reflectir essas ondas, de novo, para o modelo. Tem-se procurado minimizar este tipo de efeito de laboratório com a utilização de sistemas de absorção ativa de reflexões e pela instalação de sistemas de dissipação da energia de agitação colocadas na extremidade oposta ao sistema de geração. O sistema de dissipação utilizado atualmente no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP é uma praia de enrocamento de declive suave e o sistema de geração está também equipado com um sistema de absorção ativo.

A metodologia utilizada para avaliar o comportamento à reflexão dos modelos físicos reduzidos implantados no tanque de ondas baseia-se na separação das componentes da agitação incidente e refletida, e também para avaliar a eficácia dos sistemas de dissipação existentes.

O estudo experimental a que as diferentes tipologias de estruturas dissipadoras idealizadas no capítulo 3 foram sujeitas no tanque de ondas, permitiu compreender melhor a influência que alguns parâmetros têm neste fenómeno, como a influência das características da estrutura: porosidade, rugosidade, inclinação, espaçamento entre elementos absorventes e as características da própria onda gerada (altura e período).

De modo a rentabilizar o tempo e os recursos disponibilizados no tanque de ondas e os disponibilizados pelas empresas foi realizado um número considerável de ensaios experimentais, testando todas as configurações referidas no capítulo 3 que serão analisados em pormenor mais a frente neste capítulo.

4.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

4.2.1. DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os ensaios laboratoriais decorreram no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica, pertencente à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, Fig. 4.1.

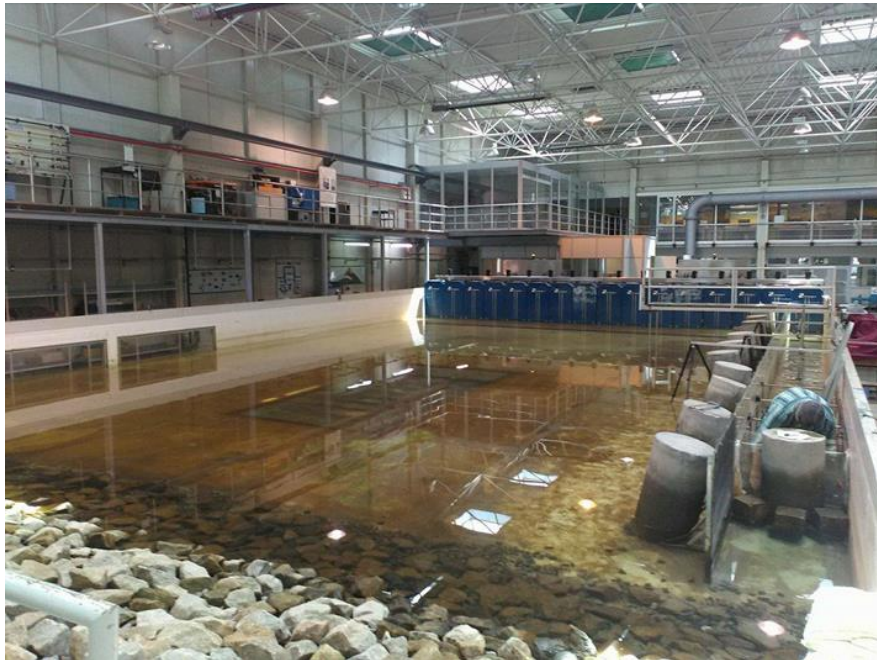


Figura 4.1 - Visão geral do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

O tanque de ondas tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma profundidade máxima de 1.2 m. Este encontra-se equipado, com um sistema de geração da agitação marítima, concebido pelo laboratório *HR Wallingford (UK)* e constituído por duas unidades modulares, cada uma com 8 pás independentes que ocupam toda a largura do tanque, tendo cada pá aproximadamente 0.75 m de largura.

Na proximidade do tanque de ondas existe uma sala de controlo onde estão instalados os softwares que permitem gerar a agitação marítima e fazer a aquisição dos dados. O sistema de geração é controlado pelo Software *HR WaveMaker*, que permite gerar ondas regulares e irregulares através de dois métodos: o método do ruído branco filtrado e o método da soma de ondas sinusoidais. O primeiro permite modificar o movimento das pás em tempo real, de forma a garantir que as ondas de longo período se propaga de forma realística no modelo físico sem sofrerem efeitos indesejados de segunda ordem.

Este sistema permite gerar vários tipos de agitação, tais como:

- Agitação irregular de crista longa (2D) e de crista curta (3D);
- Agitação bidirecional, regular e irregular, com ondas de crista longa (2D);
- Ondas regulares, normais ao gerador e oblíquas.

Através do software de geração, o estado de mar pretendido é definido com base num espectro, que é convertido com recurso a uma função de transferência (quociente entre a altura de onda e a excursão da pá em função da profundidade), numa série temporal do movimento das pás, da qual resulta a agitação marítima gerada no interior do tanque de ondas.

As sondas de níveis hidrodinâmicos medem as elevações instantâneas da superfície livre da água, sendo possível através do processamento desses registo obter as características das ondas geradas. Nos ensaios realizados utilizaram-se sondas de haste longa (600mm), por serem mais adequadas para testes com profundidades de água elevadas, Fig. 4.2.

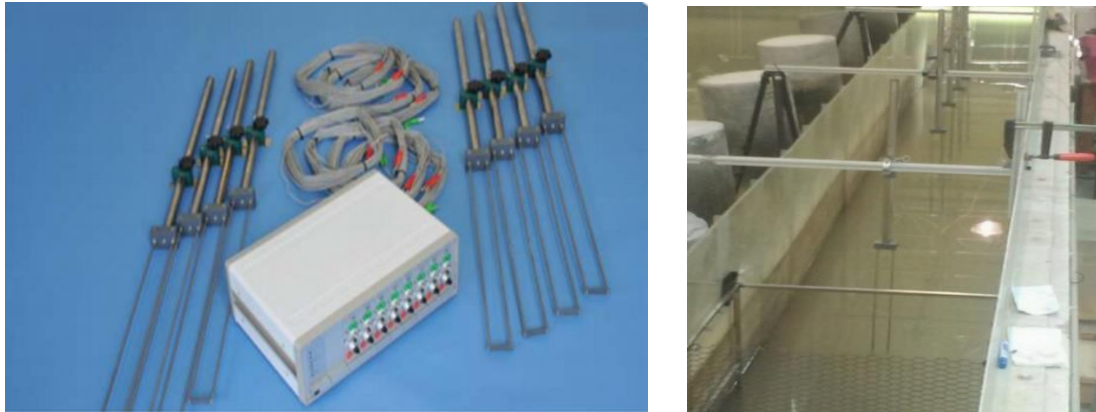


Figura 4.2 - Sondas de níveis hidrodinâmicos de haste longa utilizadas nos ensaios.

O sistema de geração tem incorporado um sistema de absorção ativo de reflexões desenvolvido igualmente pelo laboratório *HR Wallingford, UK*, e que tem como objetivo evitar que as ondas refletidas pelo modelo físico, ou pelas paredes do tanque, depois se propaguem em direção ao sistema de geração e, sejam novamente refletidas, gerando-se re-reflexões das ondas originalmente geradas. Estas re-reflexões, ao se sobreporem com as ondas a serem geradas, podem originar ondas de maior amplitude dentro do tanque.

Resumindo, de uma forma geral, a onda a ser gerada, quando o sistema de absorção ativo é acionado no sistema de controlo das pás, deve corresponder à diferença entre a onda pedida e a onda refletida. Esta última é determinada pela diferença entre a onda medida junto às pás e a onda gerada. Corrigindo desta forma a onda gerada, a onda no interior do tanque será sensivelmente igual à onda pedida. Na Fig. 4.3 pode-se observar de uma forma mais simples o funcionamento deste sistema.

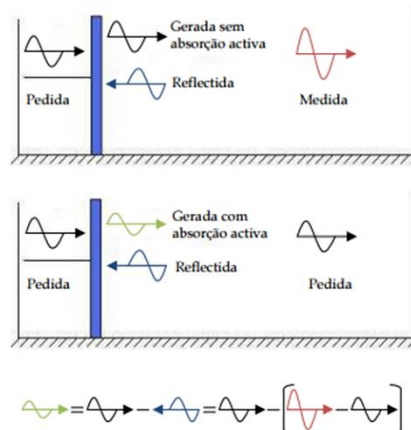


Figura 4.3 – Esquema do funcionamento do sistema de absorção ativo incorporado no sistema de geração, [Taveira-Pinto et. al, 2007]

As ondas de longo período, geralmente apresentam pequena declividade, sendo mais difíceis de absorver, pelo que nas instalações experimentais se utilizam normalmente praias dissipadoras com inclinação suave. No tanque de ondas da FEUP, do lado oposto ao sistema de geração, existe uma praia dissipadora de enrocamento, com 8.35 m de desenvolvimento e uma inclinação de aproximadamente 5%. Ensaios preliminares permitiram concluir que os coeficientes de reflexão dessa praia é da ordem dos 10 a 20%, dependendo das características da onda.

Apesar de alguns dos estados de agitação marítima reproduzidos estarem próximos dos limites de desempenho do sistema de geração, este terá a capacidade de os gerar e simultaneamente de absorver as componentes de baixa frequência refletidas pelo modelo e pelas fronteiras do tanque de ondas.

Como o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento à reflexão de um sistema de absorção das ondas, torna-se importante realizar os testes com o sistema de absorção de reflexões do gerador ativo.

Quando as condições de agitação geradas não coincidem com as pretendidas devem-se ajustar os ganhos do sistema, ou definir uma nova função de transferência. Neste trabalho, o ganho do sistema de geração foi modificado com o objetivo de ajustar a altura de onda significativa gerada à altura de onda significativa pretendida, da seguinte forma:

$$Ganho = \frac{H_{s,p}}{H_{s,g}} \times Ganho_i \quad (4.1)$$

em que, $H_{s,p}$ representa a altura de onda que se pretende gerar, $H_{s,g}$ a altura de onda gerada e $Ganho_i$ o ganho introduzido no ensaio, em que se obteve $H_{s,g}$.

4.3. PLANO DE ENSAIOS

4.3.1. CONDIÇÕES DE TESTE

Os ensaios laboratoriais foram realizados para as várias configurações enumeradas no capítulo 3 e de acordo com uma metodologia que permitisse analisar o comportamento à reflexão de um sistema de dissipação quando este é sujeito a várias condições de agitação marítima.

Não foi necessário definir qualquer tipo de escala para a construção do modelo, pois a dissertação está direccionada para interesses a nível laboratorial. A agitação utilizada nos ensaios foi do tipo regular e irregular, sendo neste último, usado como base o espectro de *Jonswap*, com um fator de pico igual a 3.3.

Nos ensaios laboratoriais é sempre recomendável simular condições de agitação marítima o mais realista possível, tendo em atenção os limites do sistema de geração. É expectável que ao gerar ondas irregulares, sejam atingidas alturas de ondas superiores a altura significativa, H_s , que representa a média do terço superior das alturas de onda. Portanto é importante estimar a altura de onda máxima plausível de ocorrer no tanque de ondas, sendo a expressão de Goda (1972), possível relacionar a altura de onda máxima com a altura de onda significativa através de,

$$H_{m\acute{a}x} = 1.8 \times H_s \quad (4.2)$$

O sistema de geração de agitação marítima consegue gerar ondas até uma determinada altura de onda máxima. Por outro lado, há também que ter em atenção os limites físicos relacionados com a rebentação da onda (profundidade de água e declividade da onda). Nas figuras 4.4 e 4.5 estão apresentadas as

condições de agitação que podem ser reproduzidas pelo sistema de geração, para uma profundidade de água de 0,30m e 0,50m, respetivamente.

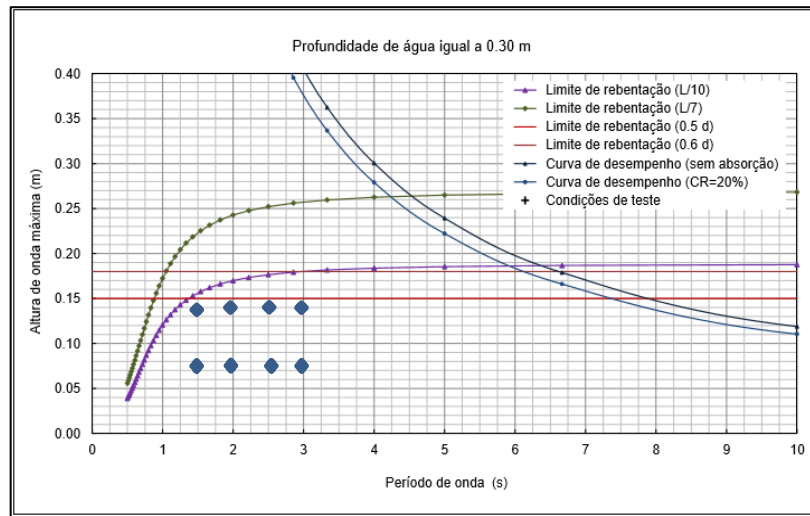


Figura 4.4 – Condições de agitação, respeitando o limite do sistema de geração para a profundidade de água de 0,30m

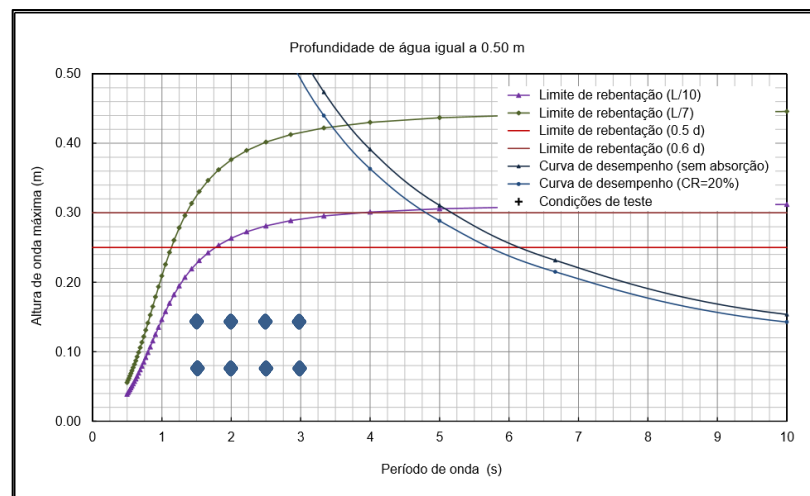


Figura 4.5 – Condições de agitação, respeitando o limite do sistema de geração para uma profundidade de água de 0,50m

As características de desempenho do sistema de geração e os critérios de rebentação da onda determinam a altura de onda que pode ser gerada para uma dada gama de frequências. Nos testes foi considerado que o sistema de absorção ativo ligado, como já foi referido. Nas figuras 4.4 e 4.5, o critério de rebentação das ondas é o mais limitativo para períodos pequenos, enquanto as características do desempenho do gerador condicionam o valor máximo da altura de onda para ondas de grande período.

De forma a verificar se a altura de onda máxima seleccionada era compatível com o limite de geração do sistema, recorreu-se ao manual do sistema de geração de agitação marítima (Beresford, 2007a). De

acordo com o manual, o critério de rebentação no interior do tanque de onda é limitado pelas seguintes condições:

$$H = \frac{L}{7} \text{TANH}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) ; H = \frac{L}{10} \text{TANH}\left(\frac{2\pi d}{L}\right), \text{ para } H \leq 0.5d \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.1, pode-se verificar as condições de teste consideradas nas configurações enunciadas em 3.4. irão ser testadas, para os dois tipos de agitação, sendo que ambos cumprem com os critérios estabelecidos anteriormente.

Tabela 4.1 - Condições de teste a serem geradas nos ensaios.

d [m]	T [s]	Hmáx [m]	Hs [m]
0.3 e 0.5	1.5	0.072	0.04
		0.144	0.08
	2	0.072	0.04
		0.144	0.08
	2.5	0.072	0.04
		0.144	0.08
	3	0.072	0.04
		0.144	0.08

4.3.2. SEQUÊNCIA DE TRABALHOS

A sequência de ensaios considerada foi:

- Série 1 - Estrutura com Placa impermeável de acrílico
- Série 2 - Estrutura com Placas de Metal distendido
 - Configuração 1 [Anexo B1]
 - Configuração 2 [Anexo B2]
- Série 3 - Estrutura com elementos flutuantes
 - Configuração 1 [Anexo B3]
 - Configuração 2 [Anexo B3]
 - Configuração 3 [Anexo B4]
 - Configuração 4 [Anexo B4]
 - Configuração 5 [Anexo B5]

Nos ensaios com agitação irregular foi utilizada uma sequência temporal com um comprimento 12. A expressão 4.3, permite estimar, em primeira aproximação, o número de ondas geradas,

$$N = \frac{2^n}{8} \quad (4.3)$$

Em que, “n” representa o comprimento da sequência temporal de ondas. Multiplicando “N” pelo período de pico, T_p , obtém-se o tempo de ciclo aproximado, gerado pelo sistema de geração de ondas em cada ensaio.

A Tabela 4.2., apresenta-se o tempo de ciclo e o número aproximado de ondas gerado para cada período de pico, com agitação irregular.

Tabela 4.2 - Tempo de ciclo esperado para gerar o numero de ondas indicado.

d [m]	T_p [s]	Nº ondas	T_{ciclo} [s]
0.3	1.5	512	768
	2		1024
	2.5		1280
	3		1536
0.5	1.5	512	768
	2		1024
	2.5		1280
	3		1536

Nos testes com agitação regular considerou-se um número de ondas igual a 100. Durante a realização dos ensaios, verificou-se que o registo dos dados recolhidos pelas sondas tinha um atraso relativamente à geração. No entanto, tal não tem qualquer consequência nos resultados, uma vez que o sistema apenas regista os dados que ocorrem dentro da duração pretendida, parando de registar assim que a duração pretendida é atingida.

4.3.3. ANÁLISE DA REFLEXÃO

A metodologia utilizada para a análise da reflexão, para os dois tipos de agitação, foi descrita mais detalhadamente no capítulo 2. No laboratório, a análise é feita no software de aquisição da agitação marítima -*HR DAQ Suite*. Este software, necessita da utilização de 4 sondas de níveis hidrodinâmicos, ou seja, a análise é realizada tendo por base os registos simultâneos das elevações da superfície livre da água nas quatro sondas alinhadas colocadas na instalação. Desta forma, é importante o espaçamento entre sondas, sendo que o software apenas requer que estas se localizem a profundidades constantes, fora da zona de rebentação e afastadas da estrutura de pelo menos um comprimento de onda, como referência.

O módulo de análise de reflexão é constituído por duas rotinas. A primeira rotina permite determinar um intervalo de frequências válidas que abranja as condições de teste, para os ensaios a realizar. Para cada um dos estados de agitação irregular e regular que se pretendem reproduzir no tanque de ondas, os espaçamentos para as quatro sondas devem garantir que para cada um deles, os respetivos limites

espetrais (0.5fp e 2.0fp) estão dentro das frequências validas. Por um processo iterativo, são testados vários espaçamentos entre as quatro sondas, até se encontrar o intervalo de frequências válidas compreendidas nesse limite espectral.

Para essa definição admite-se que a sonda 1 está na origem do eixo de referência e mais próxima do sistema de geração. Neste trabalho, a primeira sonda está aproximadamente a um comprimento de onda máximo na gama de períodos a testar, do sistema de geração (Fig. 4.6).

Na Tabela 4.3, são apresentados os espaçamentos utilizados para as duas profundidades de água testadas.

Tabela 4.3 - Espaçamento das quatro sondas de níveis hidrodinâmicos.

Sondas	S1	S2	S3	S4
Posição [m]	$x_{11} = 0$	$x_{12} = 0.35$	$x_{13} = 0.85$	$x_{14} = 1.6$
Espaçamento [m]	$\Delta x_1 = 0.35$	$\Delta x_2 = 0.5$	$\Delta x_3 = 0.75$	

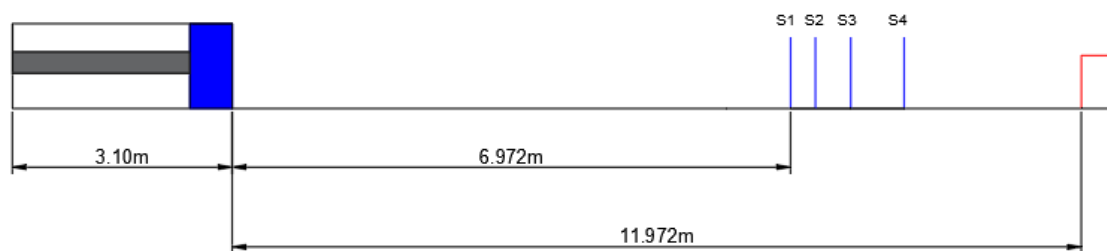


Figura 4.6 – Corte esquemático do canal que mostra a disposição de níveis hidrodinâmicos.

4.3.3.1. Agitação Regular

Para fazer a análise da reflexão para agitação regular, foi utilizada uma rotina *Matlab* que tem como base uma metodologia desenvolvida por Baldock, T.E, Simmonds, D.J (1999) que se baseou na metodologia original desenvolvida por Frigaard, P., Brosen, M. (1995), modificando o método de forma a perceber as ondas lineares normalmente incidentes que se propagam sobre um canal tendo em conta o empolamento da onda.

É um método de duas dimensões que separa as ondas incidentes e refletidas sobre fundos horizontais, no domínio do tempo. A teoria linear é usada para explicar as mudanças na amplitude da onda e da fase devido a variações de batimetria entre dois locais de medida (sondas de nível hidrodinâmico) separados espaçadamente. É um método de fácil aplicabilidade no domínio da frequência, podendo ser utilizadas tanto para ondas regulares como para ondas irregulares.

4.3.3.2. Agitação Irregular

Para a análise da reflexão com agitação irregular usou-se a segunda rotina do software *HR DAQ Suite*, que se baseia no método dos mínimos quadrados desenvolvido por Mansard e Funke, 1980, referido no capítulo 2 do presente documento. Os resultados da sua aplicação são espectros de variância da agitação incidente e refletida e o respetivo coeficiente de reflexão estimado para as frequências compreendidas

no intervalo de frequências válidas. A partir desses espectros foram calculadas as alturas de onda significativas incidente e refletida para posteriormente determinar o coeficiente de reflexão global, que como já foi referido, resulta do quociente entre a altura de onda significativa refletida e a incidente.

O procedimento de análise da reflexão para condições de agitação irregular compreende os seguintes passos:

1. Aplicação da rotina de análise da reflexão incorporada no software HR DAQ Suite;
2. Exportação dos resultados (espectros incidente e refletido e os coeficientes de reflexão para várias frequências) para um ficheiro em formato Excel (.xlsx);
3. Cálculo da altura de onda significativa incidente e da altura de onda significativa refletida da seguinte forma:

$$H_{si} = 4\sqrt{\Sigma(S_i(f))\Delta f} \quad (4.4)$$

$$H_{sr} = 4\sqrt{\Sigma(S_r(f))\Delta f} \quad (4.5)$$

4. Compara-se o valor da altura de onda incidente obtido com a altura de onda que introduzimos no sistema de geração; se estiver no intervalo válido para o ensaio, continua-se com o procedimento seguinte se der um valor muito diferente, ajusta-se o ganho e repete-se o ensaio;
5. Determina-se o coeficiente de reflexão global: $Kr = \frac{H_{si}}{H_{sr}}$, para cada condição de onda testada;
6. Repete-se o processo para todas as condições de agitação;
7. Desenham-se os espectros com os três parâmetros em função da frequência.

Na Figura 4.7 apresenta-se o resultado de um espectro resultante deste procedimento. Neste caso, é importante referir que na sua análise os coeficiente de reflexão obtidos para frequências muito afastadas da frequência de pico não são relevantes pois há pouca entergia e a avaliação é pouco precisa.

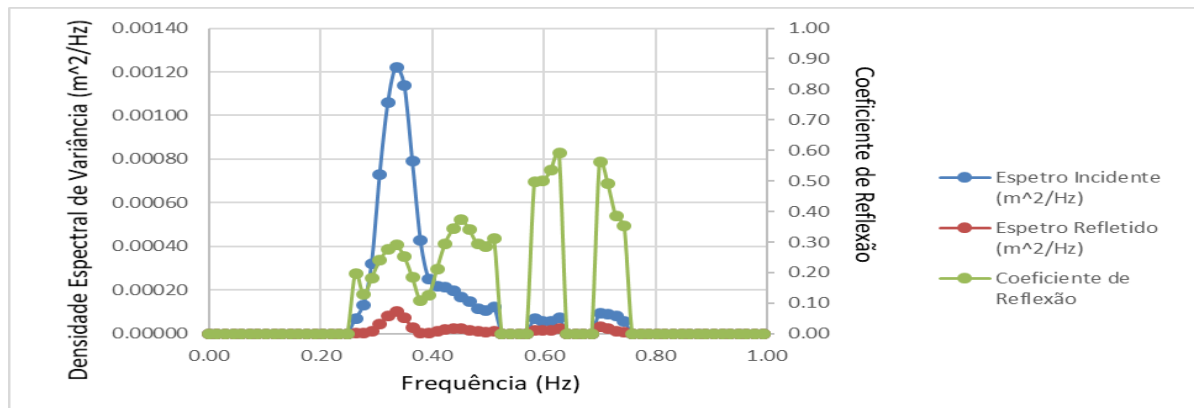


Figura 4.7 - Espectro resultante da análise da reflexão para agitação irregular ($H_s=0.04\text{m}$ e $T_p=3\text{s}$)

4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Através dos equipamentos de medição utilizados, foi possível recolher os dados necessários à análise da reflexão para as diferentes séries ensaiadas. Nesta análise apenas será considerada a agitação irregular, uma vez que se trata de condições mais realistas e porque os resultados obtidos para a agitação regular não mostraram diferenças significativas a par dos resultados com agitação irregular. Os resultados obtidos para agitação regular encontram-se nos anexos.

Neste subcapítulo será analisada a evolução do coeficiente de reflexão, em função da altura de onda significativa incidente e dos períodos de onda de pico considerados nos ensaios. Irão ainda ser apresentados gráficos da evolução do coeficiente de reflexão em função de um parâmetro adimensional que relaciona a profundidade de água, d , a aceleração gravítica, g , e o período de onda de pico, T_p .

4.4.1. ESTRUTURA COM PLACA IMPERMEÁVEL DE ACRÍLICO

Seguindo o plano de ensaios referido em 4.3, procedeu-se à primeira série de testes com a estrutura inserida no canal apenas com a placa vertical de acrílico na parte traseira. Na Tabela 4.4 apresentam-se os coeficientes de reflexão obtidos após a análise dos registos das sondas de níveis hidrodinâmicos, para agitação regular e irregular para esta configuração. Os coeficientes de reflexão obtidos nos ensaios variaram entre 0.70 e 0.90, sendo estes os valores esperados em laboratório, devido a alguma dissipação que tenha ocorrido ao longo do canal até chegar a placa vertical impermeável de acrílico. Como referência os coeficientes de reflexão esperados para estruturas verticais estão entre 0.90 e 1, Goda (1985).

Tabela 4.4 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, usando uma estrutura vertical na zona a sotamar do sistema de absorção.

Tipo de Agitação	d [m]	H_s [m]	T [s]	Cr	Tipo de Agitação	d [m]	H_s [m]	T [s]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.80	Irregular	0.3	0.04	1.5	0.78
			2	0.72				2	0.77
			2.5	0.83				2.5	0.78
			3	0.79				3	0.82
		0.08	1.5	0.86			0.08	1.5	0.77
			2	0.74				2	0.75
			2.5	0.80				2.5	0.76
			3	0.87				3	0.82
	0.5	0.04	1.5	0.69		0.5	0.04	1.5	0.80
			2	0.86				2	0.83
			2.5	0.98				2.5	0.83
			3	0.74				3	0.81
		0.08	1.5	0.64			0.08	1.5	0.76
			2	0.86				2	0.82
			2.5	0.88				2.5	0.84
			3	0.79				3	0.84

Os valores dos coeficientes de reflexão obtidos para a série de ensaios com a placa vertical de acrílico serão utilizados como base de comparação para as restantes séries ensaiadas. Pela análise da tabela nesta configuração, pode-se verificar uma variação pouco significativa do coeficiente de reflexão com os parâmetros da onda, tanto para agitação regular como para agitação irregular.

4.4.2. SISTEMA DE DISSIPACÃO COM METAL DISTENDIDO

Para este material foram consideradas duas configurações. As grelhas foram cortadas à medida e colocadas na estrutura. Esta tipologia de estrutura, tem mostrado ser bastante eficiente no que toca à dissipação de energia das ondas, ou sejam, apresenta bom comportamento à reflexão, devido às suas aberturas que conferem uma porosidade e rugosidade à grelha, permitindo dissipar a energia da onda incidente. Os estudos referenciados anteriormente mostram que o número de grelhas a colocar no interior da estrutura têm uma influência grande na redução dos coeficientes de reflexão.

As duas configurações testadas, são bastante semelhantes, apenas diferem no número de placas colocadas, como se constata nas Tabelas 3.4 e 3.5, de forma a verificar a influência que o seu número tem nos resultados.

4.4.2.1. Configuração 1

Na Tabela 4.5, estão apresentados os resultados obtidos para esta configuração quando submetida às condições de teste para agitação irregular. A Figura 4.8 apresenta a variação dos coeficientes de reflexão para a configuração 1 em função dos períodos de onda de pico para os dois níveis de maré associados e para as duas alturas de onda significativa testadas. Na Figura 4.9, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a altura de onda significativa de 0,04 m e na Fig. 4.10, para a altura de onda significativa de 0,08 m. É ainda apresentado na Figura 4.11 que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0,04 m e 0,08 m.

Tabela 4.5 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 1 do sistema dissipativo com metal distendido.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hsi [m]	Hsr [m]	Cr
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0401	0.0234	0.58
			2	0.0399	0.0241	0.60
			2.5	0.0380	0.0250	0.66
			3	0.0382	0.0250	0.65
		0.08	1.5	0.0788	0.0382	0.48
			2	0.0794	0.0406	0.51
			2.5	0.0781	0.0453	0.58
			3	0.0767	0.0482	0.63
	0.5	0.04	1.5	0.0402	0.0265	0.66
			2	0.0394	0.0254	0.64
			2.5	0.0395	0.0299	0.76
			3	0.0419	0.0306	0.73
		0.08	1.5	0.0800	0.0486	0.61
			2	0.0758	0.0514	0.68
			2.5	0.0815	0.0570	0.70
			3	0.0798	0.0532	0.67

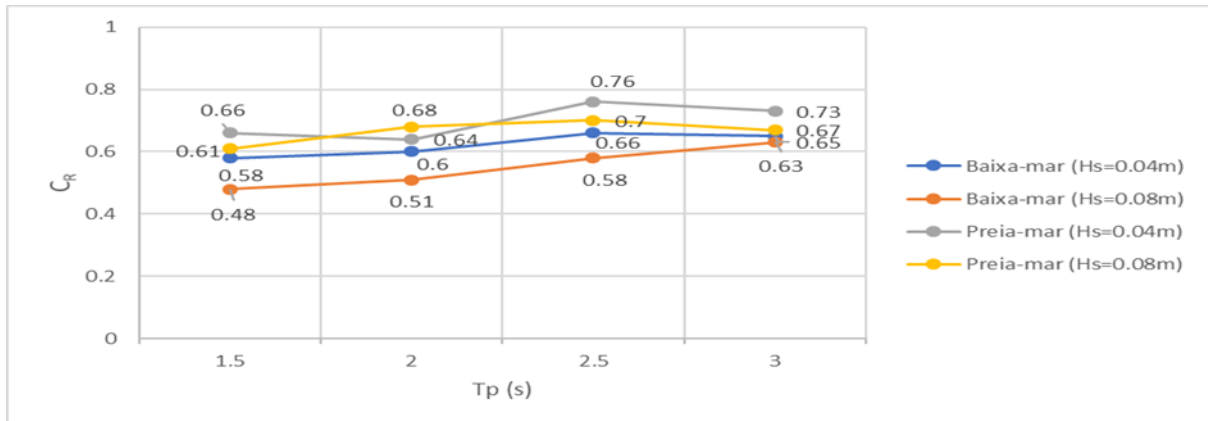


Figura 4.8 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

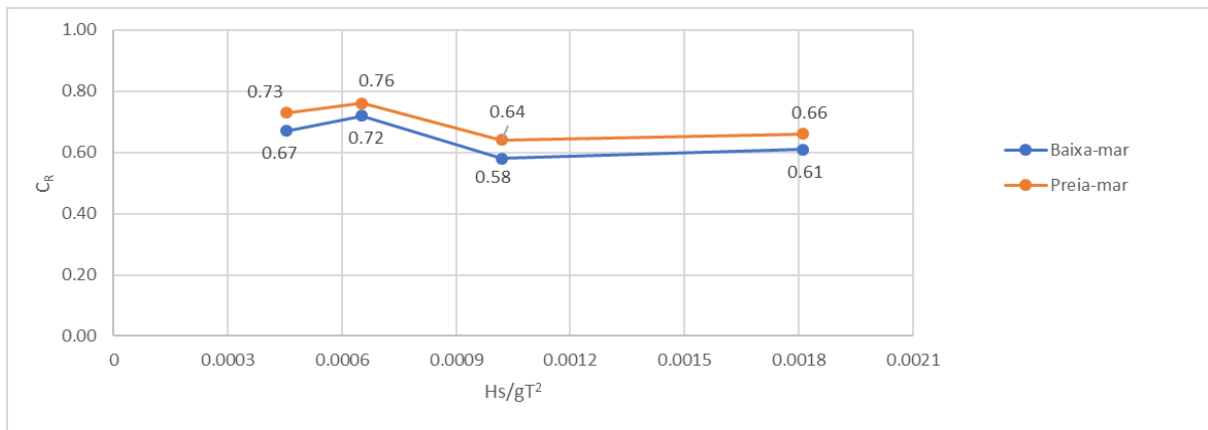


Figura 4.9 – Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.

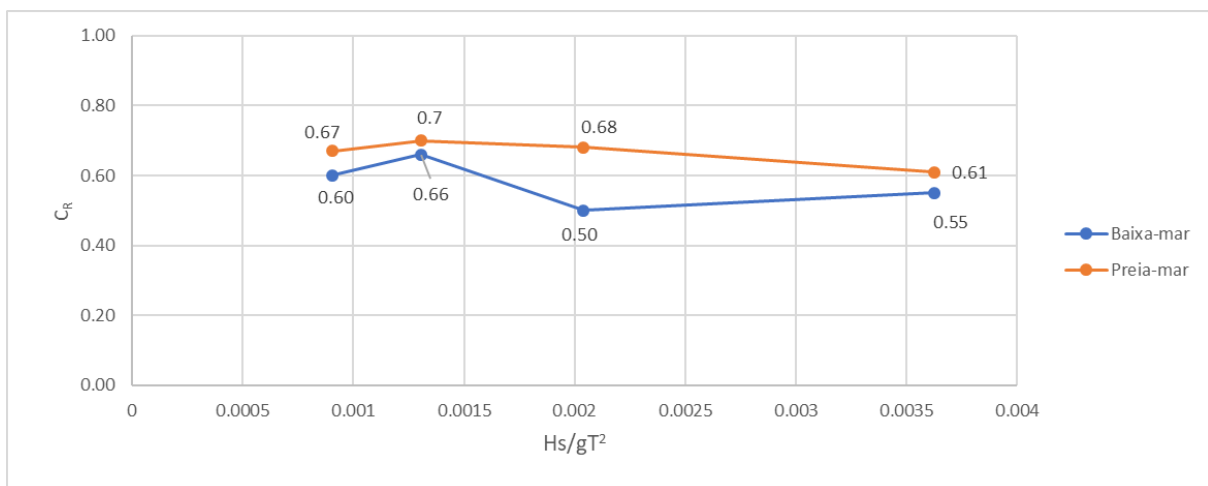


Figura 4.10 – Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

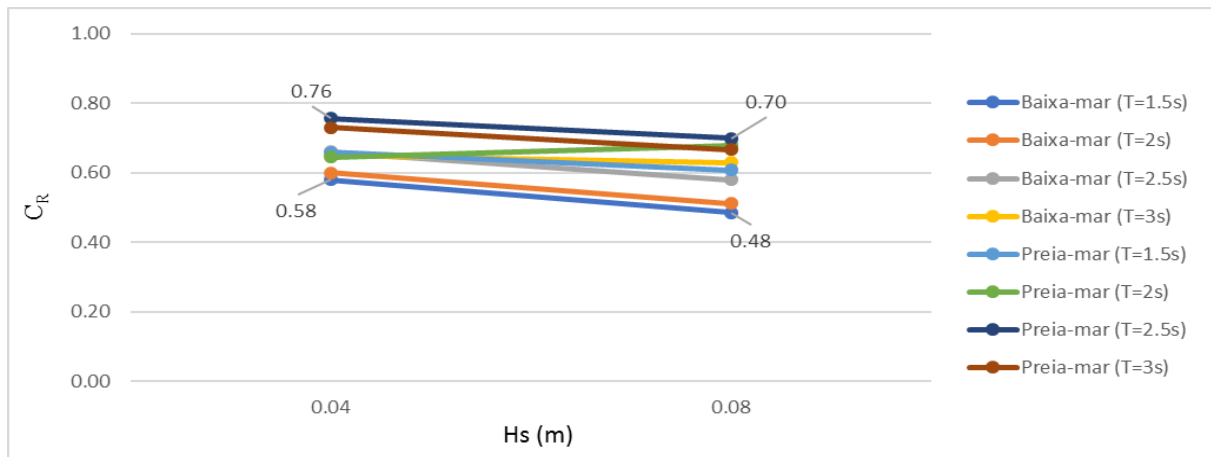


Figura 4.11 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

Pela análise do gráfico 4.8, pode-se verificar que o aumento do nível médio de água resulta em coeficientes de reflexão maiores. À medida que o período de pico cresce, o coeficiente de reflexão aumenta. Contudo, nota-se que a evolução do coeficiente de reflexão é mais pronunciada para o nível de baixa-mar do que para preia-mar, isto quer dizer que para níveis de maré mais elevados, a influência da altura de onda e dos períodos da onda não é tão relevante como para os níveis de maré mais baixos. Neste mesmo gráfico pode-se verificar que entre a gama de períodos 3 e 4s se verifica um tendência decrescente dos coeficientes de reflexão.

Na Figura 4.9 observa-se uma evolução quase paralela dos coeficientes de reflexão para o nível de preia mar e baixa mar, para a altura de onda significativa de 0,04m. Nota-se que a influência da profundidade teve um impacto significativo nos valores obtidos, sendo menores para a condição de baixa mar.

Na Figura 4.10 pode-se verificar que para os níveis de preia mar houve pouca variação do coeficiente de reflexão. Já para baixa mar, existe uma discrepância entre o período 2s e o período de 3s.

No Figura 4.11, o coeficiente de reflexão decresce com o aumento da altura de onda gerada como se esperava, obtendo-se os coeficientes de reflexão mais baixos para uma situação de baixa-mar e para o menor período de pico.

Os resultados obtidos variaram então entre 48 a 76%, estando longe do objetivo pretendido. Pode ser explicado pelo facto de o número de placas ser demasiado reduzido e os espaçamentos não serem suficientemente curtos para obter uma dissipação mais eficaz. Pode também ter influência a sua posição que não sendo bem definida pode ter sofrido oscilações verticais que eram difíceis de dissipar. Durante os ensaios pode também ter ocorrido alguma rebentação que poderá ter levado a uma alteração nos resultados. Ao reduzir os espaçamentos, especialmente na parte traseira utilizando grelhas com porosidades menores poderá ser possível obter melhores resultados. O que leva a construção da configuração 2.

4.4.2.2. Configuração 2

Para esta configuração foi adicionada mais uma placa e reduziu-se os espaçamentos a sotamar, com o intuito de se verificar melhoras nos resultados. Na Tabela 4.6 estão apresentados os coeficientes de reflexão obtidos para as condições de agitação, de certa forma houve alguma redução dos coeficientes de reflexão, embora esteja longe da gama de valores que se pretende obter. A Figura 4.12 apresenta a

variação do coeficiente de reflexão em função do período de onda pico para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.13 está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a altura de onda significativa de 0,04 m e na Fig. 4.14, para a altura de onda significativa de 0,08 m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.15, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0,04 m e 0,08 m.

Tabela 4.6 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 2 do sistema dissipativo com metal distendido.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0401	0.0188	0.47
			2	0.0404	0.0205	0.51
			2.5	0.0393	0.0231	0.59
			3	0.0390	0.0227	0.58
		0.08	1.5	0.0807	0.0278	0.34
			2	0.0804	0.0307	0.38
			2.5	0.0780	0.0364	0.47
			3	0.0798	0.0389	0.49
	0.5	0.04	1.5	0.0360	0.0210	0.58
			2	0.0372	0.0232	0.62
			2.5	0.0383	0.0244	0.64
			3	0.0433	0.0274	0.63
		0.08	1.5	0.0796	0.0359	0.45
			2	0.0816	0.0441	0.54
			2.5	0.0802	0.0470	0.59
			3	0.0779	0.0477	0.61

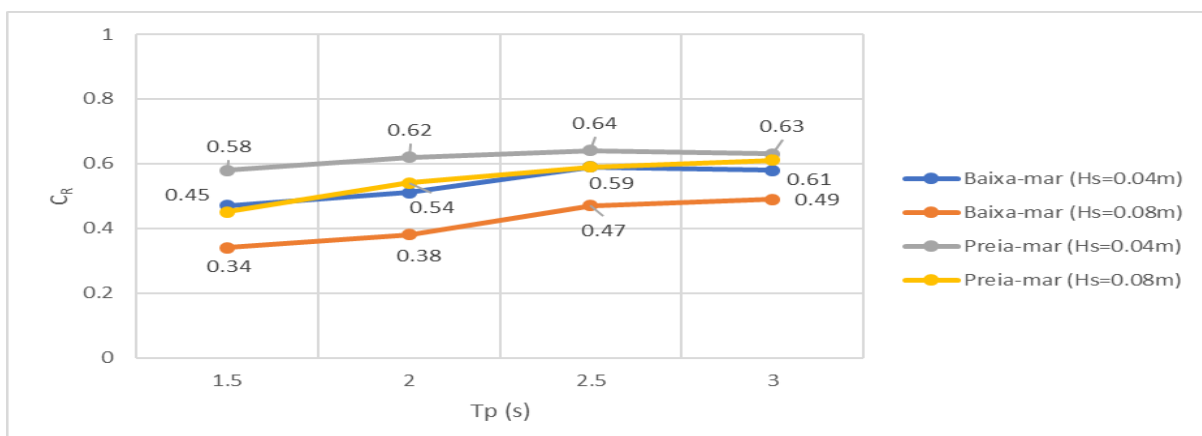


Figura 4.12 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

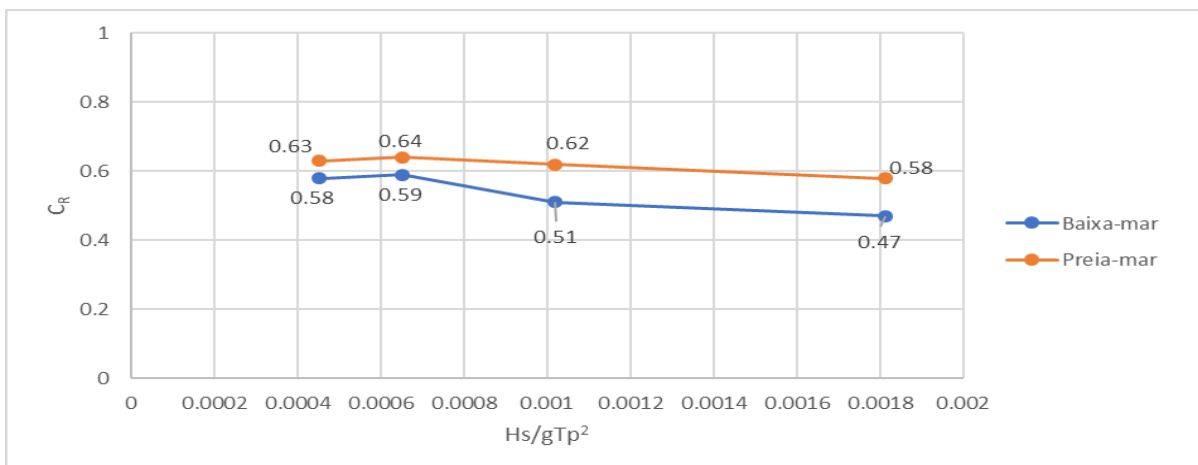


Figura 4.13 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

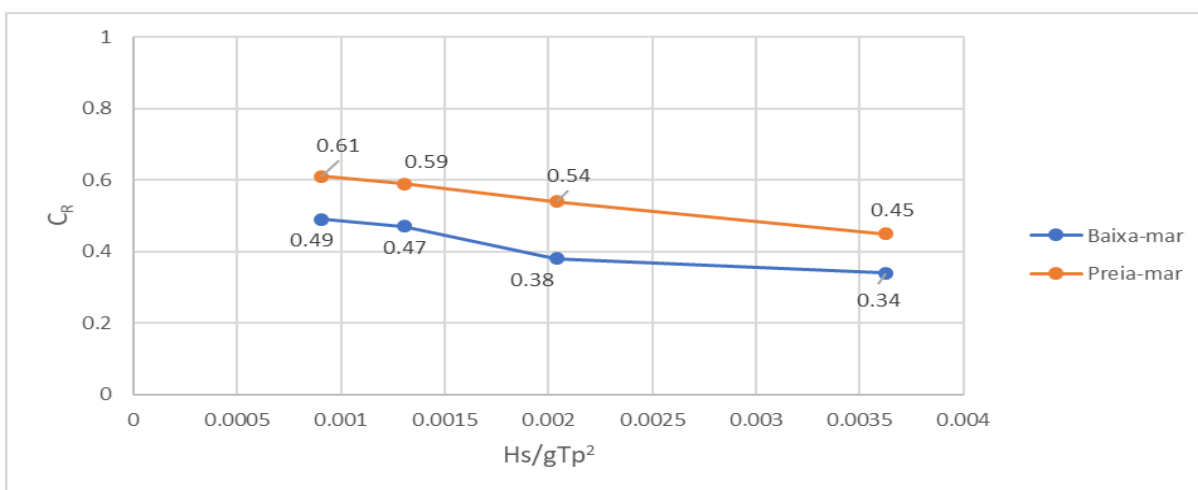


Figura 4.14 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.

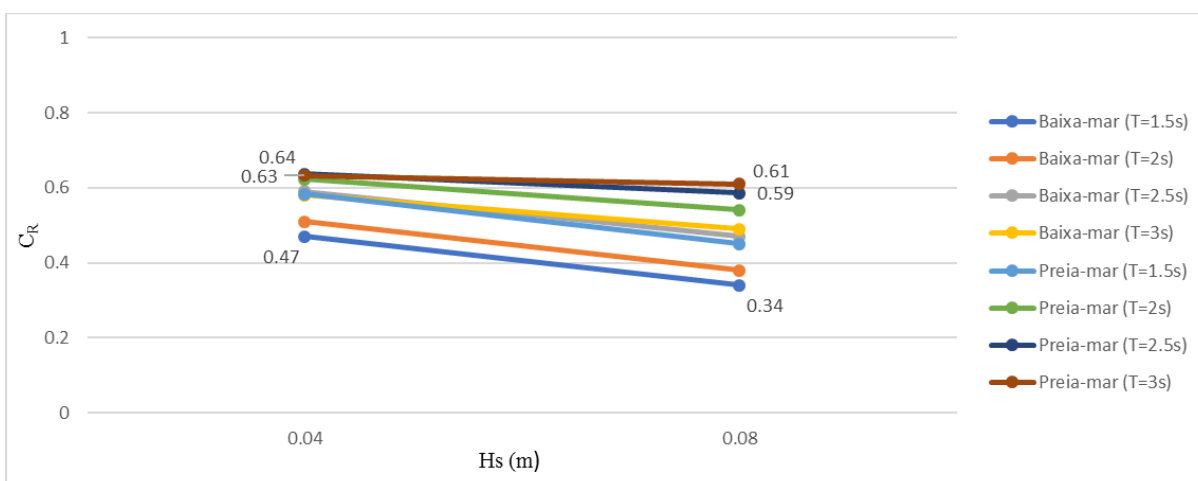


Figura 4.15 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

Pela análise do gráfico da Fig. 4.12 pode-se verificar que para os níveis de baixa-mar o crescimento do coeficiente de reflexão é mais pronunciado do que para níveis de preia-mar, em que os valores se mantêm praticamente próximos, o que pode significar que o período tem bastante influência na evolução do coeficiente de reflexão para níveis de maré mais elevados do que para níveis de maré mais baixos.

Nas Figuras 4.13 e 4.14 pode-se constatar que os valores se mantêm praticamente constantes ainda que para níveis de baixa-mar obteve-se os valores de coeficientes de reflexão menores mais uma vez.

No gráfico da Fig. 4.15, verifica-se uma grande redução do coeficiente de reflexão para todas as condições, quando se aumenta a altura de onda. Isto pode significar que as grelhas com uma porosidade mais elevada, colocadas a barlar foram bastante eficazes em absorver a energia incidente das ondas de pequena declividade, assim como a redução do espaçamento a sotamar o que permitiu absorver a energia incidente das ondas com maior declividade. No entanto, os valores decrescem mais acentuadamente para o nível de maré mais baixo do que para o nível de maré mais elevado, sendo que a influência deste parâmetro para o nível de preia mar pouco significativo

Relativamente à configuração 1, houve melhorias significativas, os resultados variaram entre 34% a 64%, pelo que a influência dos novos espaçamentos e a adição de uma nova grelha ter sido satisfatória.

4.4.3. ELEMENTOS FLUTUANTES

O elemento flutuante utilizado nos ensaios era constituído por rolhas de cortiça de variadas naturezas, como já foi referido. Um material inovador que engloba bastantes propriedades que podem contribuir para a dissipação da energia das ondas. Este elemento como flutua, estando parte submersa na água, cria fenómenos de turbulência permitindo que as partículas de água percorram os vazios criados no aglomerado, permitindo essa dissipação. Por ser poroso, este material absorve parte da energia que atravessa a camada deste elemento. Portanto no geral, é um material que reflete, transmite e absorve a energia incidente.

Foram analisadas 5 configurações, usando apenas uma câmara da estrutura para a colocação das rolhas, em cada configuração. As configurações variam na extensão da câmara, na quantidade de rolhas utilizadas, na combinação com o material de metal distendido, entre outros.

4.4.3.1. Configuração 1

Para esta configuração, é de relembrar que tem uma câmara de elementos flutuantes de 1.5m de extensão na estrutura base, e com um volume de 300L de rolhas. Na tabela 4.7 estão apresentados os coeficientes de reflexão obtidos para as condições de teste. A Figura 4.16 apresenta a variação dos coeficientes de reflexão em função dos períodos para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.17, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a altura de onda significativa de 0,04 m e na Fig. 4.18, para a altura de onda significativa de 0,08 m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.19, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0,04m e 0,08m.

Tabela 4.7 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 1 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0410	0.0182	0.44
			2	0.0437	0.0158	0.36
			2.5	0.0436	0.0122	0.28
			3	0.0433	0.0120	0.28
		0.08	1.5	0.0807	0.0338	0.42
			2	0.0784	0.0290	0.37
			2.5	0.0796	0.0265	0.33
			3	0.0757	0.0200	0.26
	0.5	0.04	1.5	0.0400	0.0155	0.39
			2	0.0427	0.0093	0.22
			2.5	0.0418	0.0087	0.21
			3	0.0399	0.0134	0.34
		0.08	1.5	0.0815	0.0253	0.31
			2	0.0770	0.0144	0.19
			2.5	0.0801	0.0176	0.22
			3	0.0778	0.0206	0.26

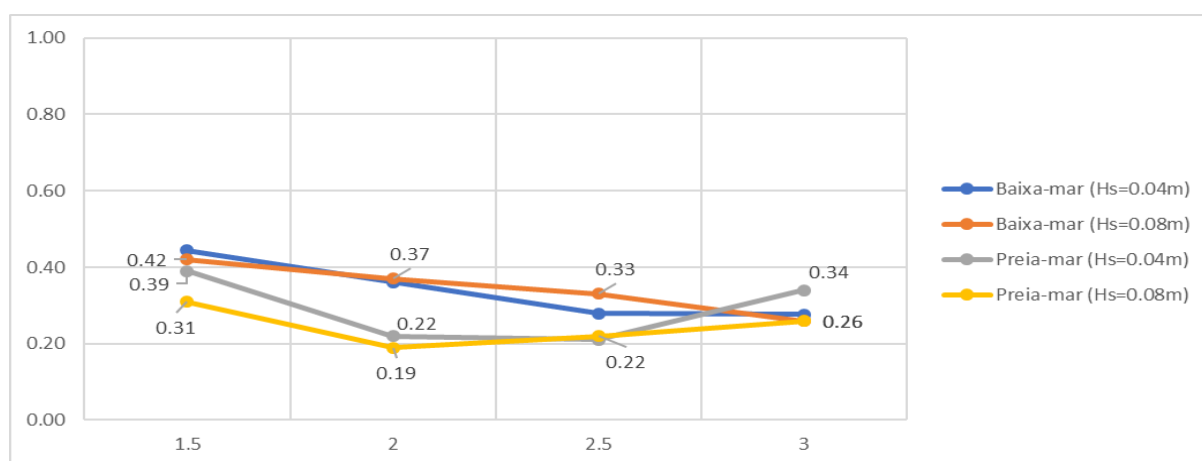


Figura 4.16 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

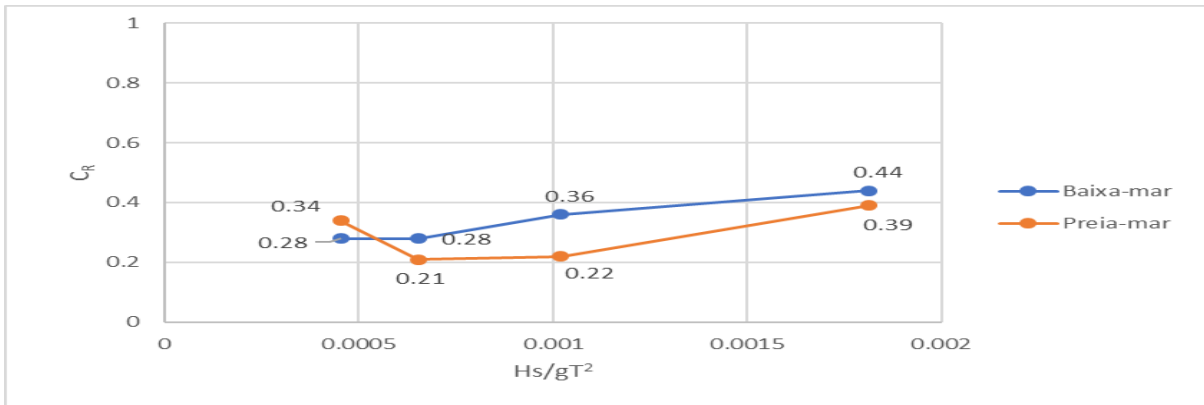


Figura 4.17 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

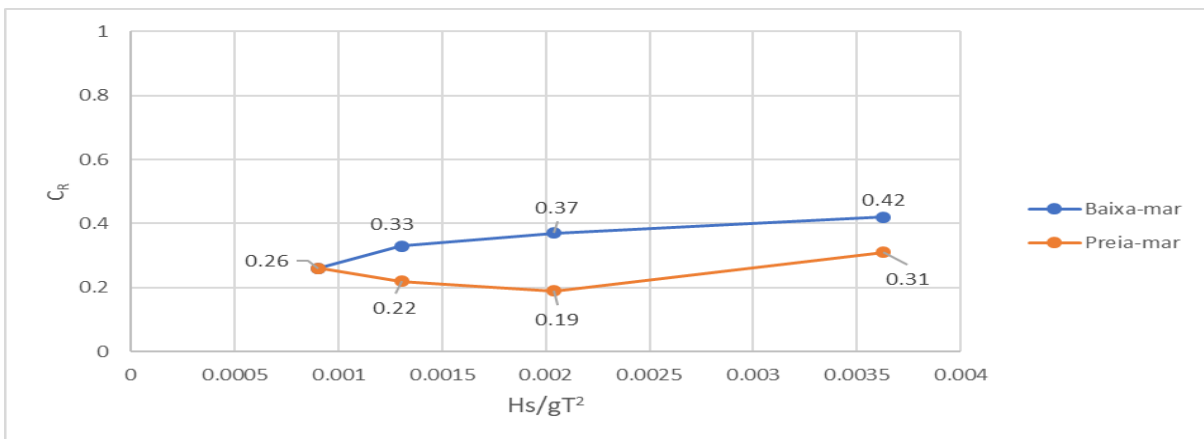


Figura 4.18 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.

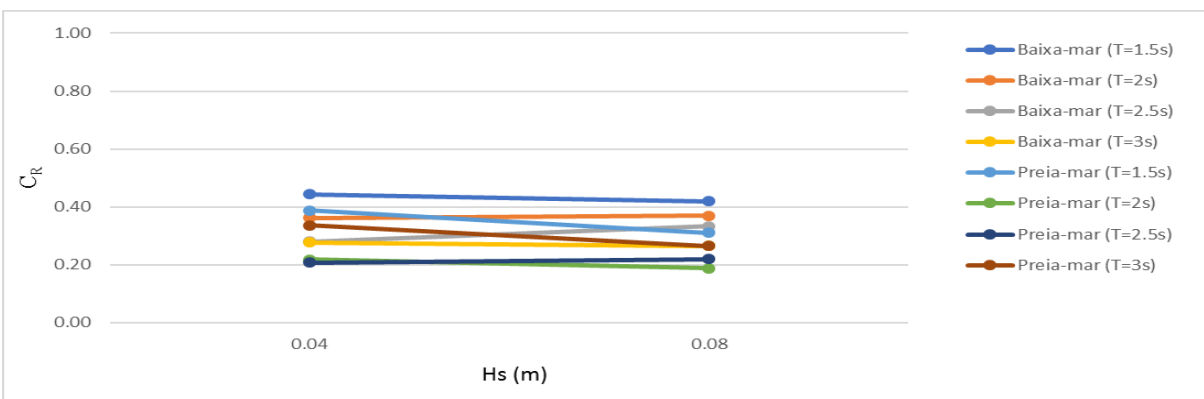


Figura 4.19 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

Pela análise do gráfico 4.16, o cenário muda comparado com as configurações anteriores. À medida que o período aumenta, obtêm-se coeficientes relativamente mais baixos, no entanto verifica-se uma ligeira subida no período de pico de 3s para todas as condições, principalmente na situação de preia-mar para uma altura de onda significativa de 0,04 m, que se torna mais acentuada. O que pode explicar esta descida de valores pode estar também relacionado com alguma rebentação antes da onda incidir sobre a

estrutura e ter dissipado alguma energia nos ensaios que compreendiam os períodos de 1,5s a 2,5s. Confirma-se para esta configuração que a influência na variação do período de onda é menor para os níveis de maré mais baixos. No entanto, para esta configuração, os níveis de preia-mar originaram melhores resultados quanto à reflexão.

Para este setup, verificou-se que por ter uma quantidade grande de rolhas a configuração por vezes comportava-se como uma barreira por estar demasiado condensada, o que leva a que a onda ao incidir não tenha tanto espaço para percorrer a camada e dissipar a energia de forma eficiente, podendo ter havido algumas reflexões no embate da onda com a grelha vertical colocada para limitar a câmara. Quanto à sua variação com a altura de onda, Fig.4.19 pode-se concluir que ao aumentar este parâmetro o coeficiente de reflexão não tem alterações significativas para as várias condições, pelo que a altura significativa da onda pouca influência teve nos resultados obtidos.

Os resultados apesar de altos mostram-se mais próximos dos resultados obtidos para a solução tradicional. Sendo que a melhoria que se fez de modo a tornar a estrutura mais eficiente na configuração seguinte, foi reduzir o volume de rolhas para permitir uma oscilação mais uniforme e a colocação de peso sobre a camada de rolhas para permitir uma maior submersão das rolhas.

4.4.3.2. Configuração 2

Na Tabela 4.8 estão apresentados os coeficientes de reflexão obtidos para esta configuração utilizando os elementos flutuantes. Na Figura 4.20, apresenta a variação dos coeficientes de reflexão em função dos períodos para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.21, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a profundidade de 0.30m e na Fig. 4.22, para a profundidade de 0.50m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.23, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0.04m e 0.08m.

Tabela 4.8 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 2 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr [%]
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0356	0.0067	0.19
			2	0.0356	0.0064	0.18
			2.5	0.0399	0.0102	0.26
			3	0.0379	0.0113	0.30
		0.08	1.5	0.0777	0.0130	0.17
			2	0.0775	0.0081	0.10
			2.5	0.0781	0.0140	0.18
			3	0.0754	0.0174	0.23
	0.5	0.04	1.5	0.0409	0.0072	0.18
			2	0.0407	0.0118	0.29
			2.5	0.0417	0.0151	0.36
			3	0.0359	0.0149	0.42
		0.08	1.5	0.0832	0.0134	0.16
			2	0.0831	0.0169	0.20
			2.5	0.0778	0.0228	0.29
			3	0.0798	0.0273	0.34

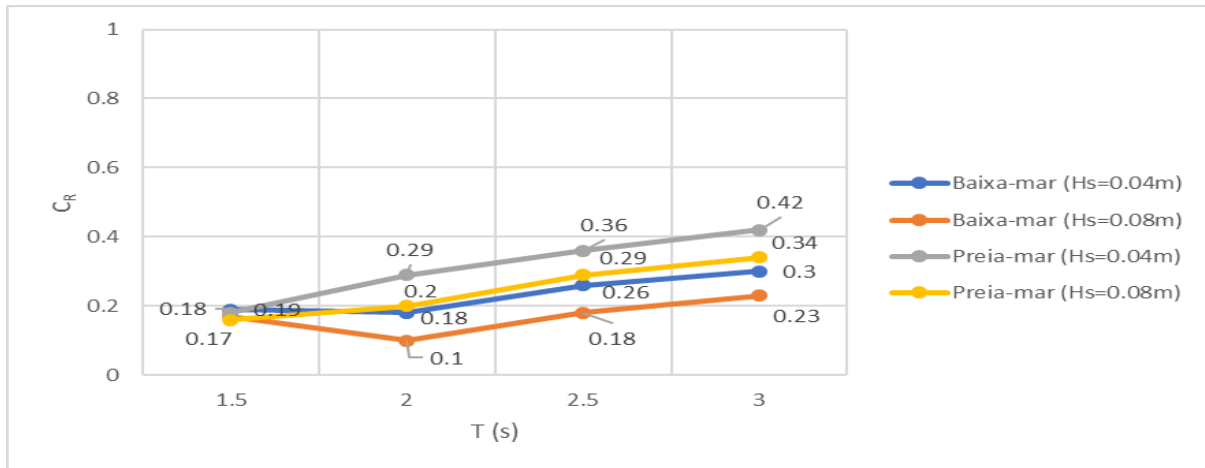


Figura 4.20 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

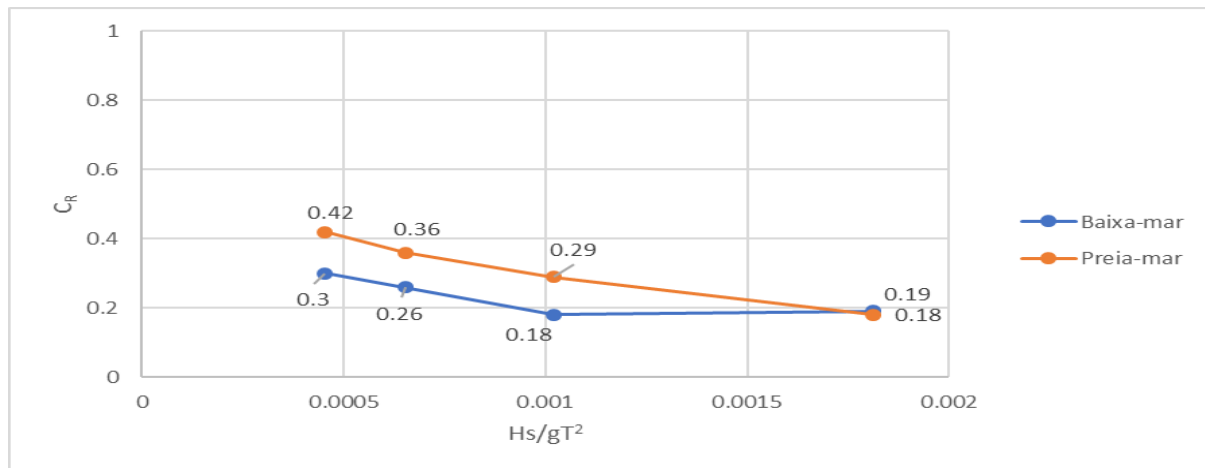


Figura 4.21 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

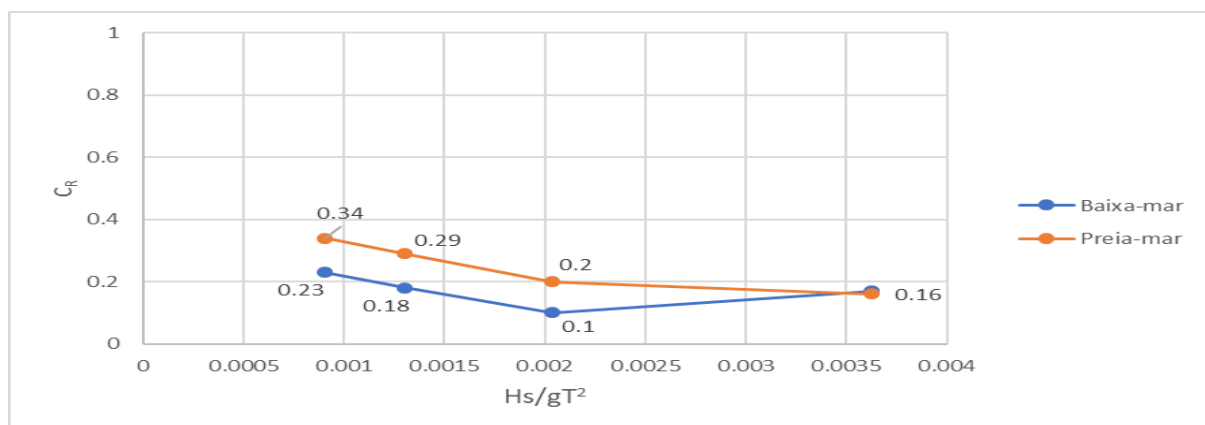


Figura 4.22- Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.

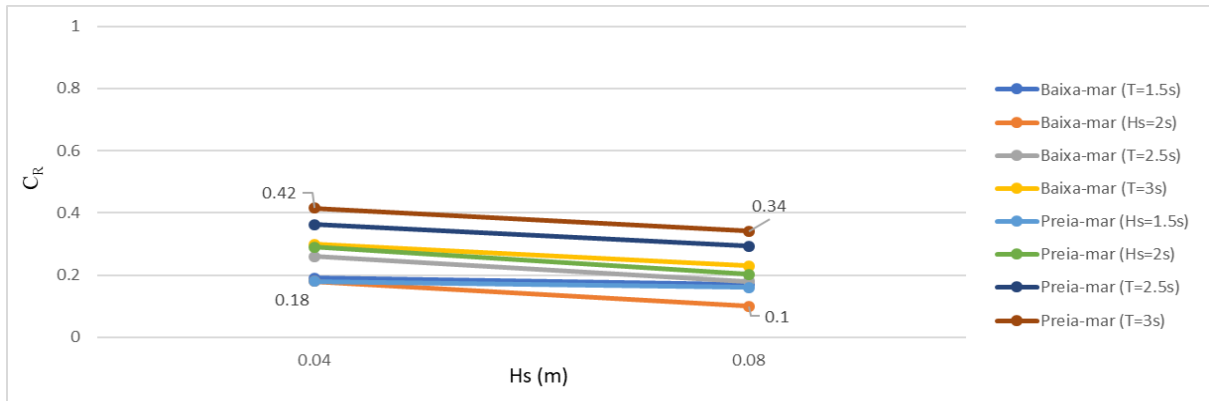


Figura 4.23 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

Pela análise da Figura 4.20, pode-se verificar que o aumento dos coeficientes de reflexão é acompanhado pelo aumento do período para todas as condições. A redução do volume de rolhas foi bastante positivo, para ambas as profundidades notou-se um acompanhamento ligeiro da camada de rolhas com a oscilação da onda e pelo facto de haver uma profundidade submersa maior, permitiu que a dissipação da energia incidente tivesse sido mais eficiente e os coeficientes de reflexão tivessem reduzido para ambas as profundidades, sendo que para o nível de baixa-mar obteve-se coeficientes de reflexão muito menores.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 a evolução do traçado é semelhante nos dois casos, embora os valores sejam diferentes. Os resultados obtidos para a altura de onda significativa maior foram muito inferiores aos da altura de onda significativa menor. Assim como se verificam novamente valores inferiores para a profundidade mais pequena, 0,30 m.

Pela Figura 4.23 confirma-se que ao aumentar a altura de onda significativa os coeficientes de reflexão reduzem substancialmente pelo que o parâmetro influenciou a variação deste parâmetro para todas as condições da onda.

4.4.3.3. Configuração 3

A Tabela 4.9 e 4.10 apresenta os coeficientes de reflexão relativos a terceira configuração utilizando elementos flutuantes. A Figura 4.24 mostra a variação dos coeficientes de reflexão em função dos períodos para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.25, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a altura de onda significativa de 0,04 m e na Fig. 4.26, para a altura de onda significativa de 0,08 m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.27, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0,04m e 0,08m.

Tabela 4.9 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 3 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0356	0.0067	0.21
			2	0.0356	0.0064	0.23
			2.5	0.0399	0.0102	0.32
			3	0.0379	0.0113	0.36

Tabela 4.10 – Continuação da Tabela 4.9 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 3 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Irregular	0.3	0.08	1.5	0.0777	0.0130	0.19
			2	0.0775	0.0081	0.21
			2.5	0.0781	0.0140	0.27
			3	0.0754	0.0174	0.32
	0.5	0.04	1.5	0.0409	0.0072	0.29
			2	0.0407	0.0118	0.34
			2.5	0.0417	0.0151	0.41
			3	0.0359	0.0149	0.46
		0.08	1.5	0.0832	0.0134	0.30
			2	0.0831	0.0169	0.35
			2.5	0.0778	0.0228	0.40
			3	0.0798	0.0273	0.45

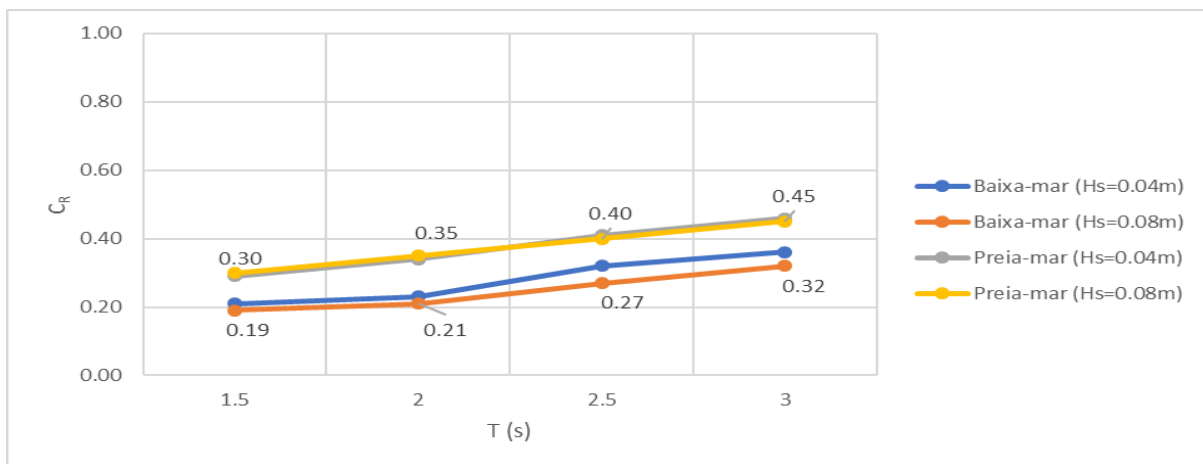


Figura 4.24 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

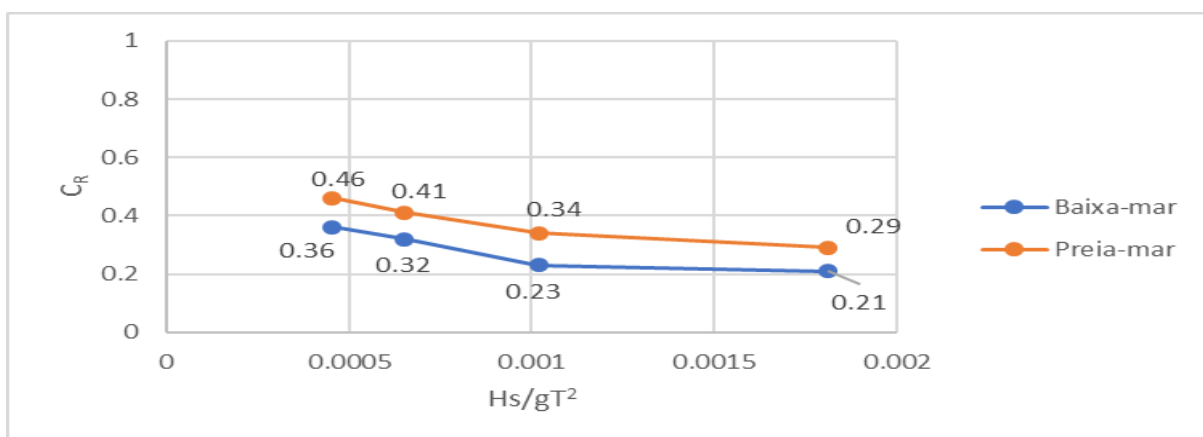


Figura 4.25 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

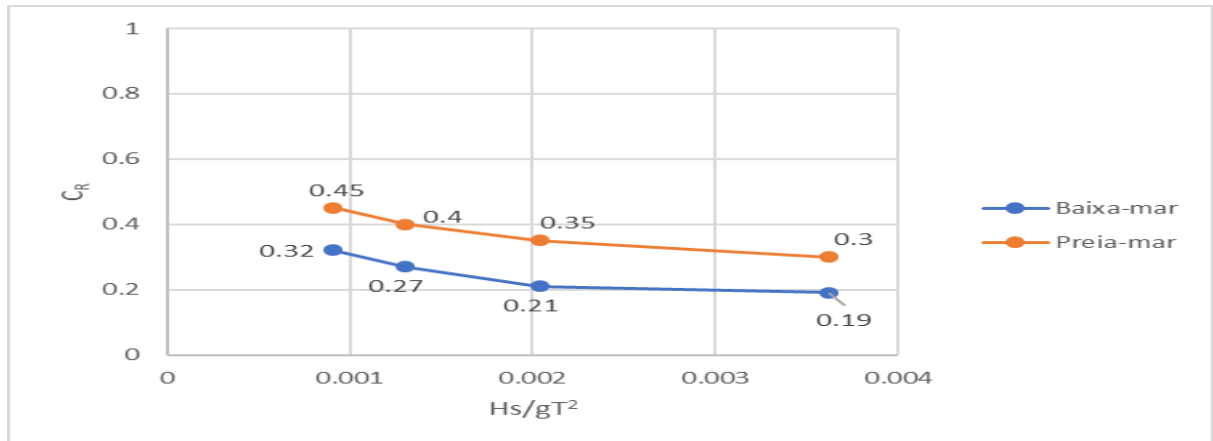


Figura 4.26 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.

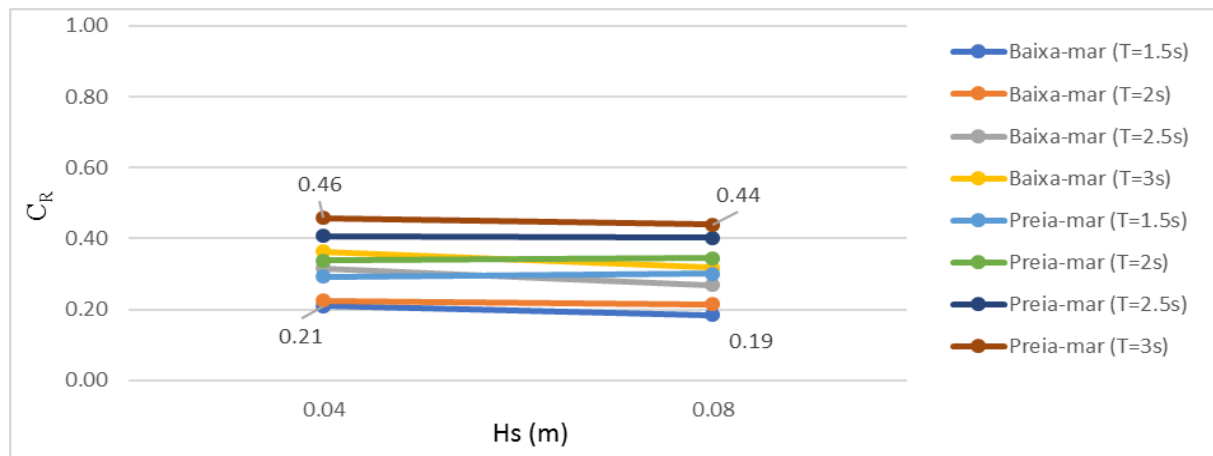


Figura 4.27 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

Para esta configuração, adotou-se uma combinação de grelhas verticais com uma câmara de rolhas a sotamar da estrutura de extensão mais reduzida que a anterior. Pode-se constatar pela análise do gráfico da Figura 4.24, que o coeficiente de reflexão aumenta ligeiramente com o aumento do período de pico, embora mais uma vez se registem coeficientes de reflexão mais altos para os níveis de preia-mar.

Pela análise da Figura 4.25 e 4.26, a evolução do traçado é novamente semelhante para as duas alturas de onda significativas. Havendo uma diferença maior na variação dos coeficientes de reflexão entre os traçados para a altura de onda significativa de 0,08m do que para 0,04 m, embora os valores em função do parâmetro adimensional sejam pouco significativos, sendo praticamente constantes.

Pela análise do gráfico da figura 4.27, pode-se verificar que para os vários níveis de maré e períodos de pico, a variação do coeficiente de reflexão ao aumentar a altura de onda, é quase inexistente. Isso pode significar que a altura de onda não tem grande influência na evolução do coeficiente de reflexão.

Para esta configuração ao diminuir a extensão da câmara, usou-se um volume de rolhas aproximadamente igual a 200L, no entanto verificou-se exatamente o que aconteceu na configuração 2, a camada comportou-se como uma barreira, no entanto ao ter as grelhas permitiu que houvesse alguma dissipação da energia incidente, o que resultou em valores aproximados ao que se pretendia.

4.4.3.4. Configuração 4

Para esta configuração, a Figura 4.28, apresenta a variação dos coeficientes de reflexão em função dos períodos para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.29, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a profundidade de 0.30m e na Fig. 4.30, para a profundidade de 0.50m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.31, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0.04m e 0.08m

Tabela 4.11 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 4 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr [%]
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0356	0.0061	0.17
			2	0.0351	0.0050	0.14
			2.5	0.0404	0.0089	0.22
			3	0.0408	0.0116	0.28
		0.08	1.5	0.0833	0.0132	0.16
			2	0.0825	0.0073	0.09
			2.5	0.0835	0.0133	0.16
			3	0.0828	0.0181	0.22
	0.5	0.04	1.5	0.0423	0.0067	0.16
			2	0.0416	0.0113	0.27
			2.5	0.0431	0.0159	0.37
			3	0.0367	0.0153	0.42
		0.08	1.5	0.0802	0.0110	0.14
			2	0.0788	0.0148	0.19
			2.5	0.0796	0.0216	0.27
			3	0.0749	0.0248	0.33

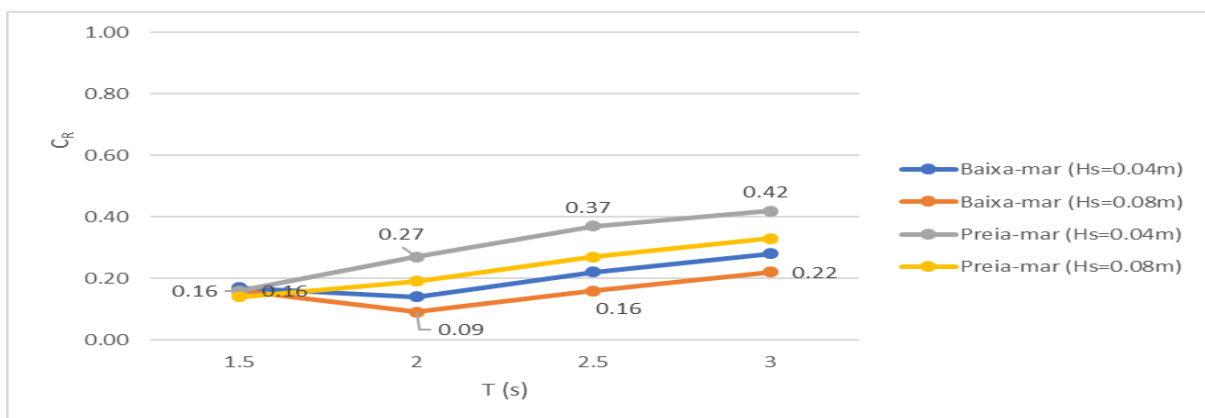


Figura 4.28 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

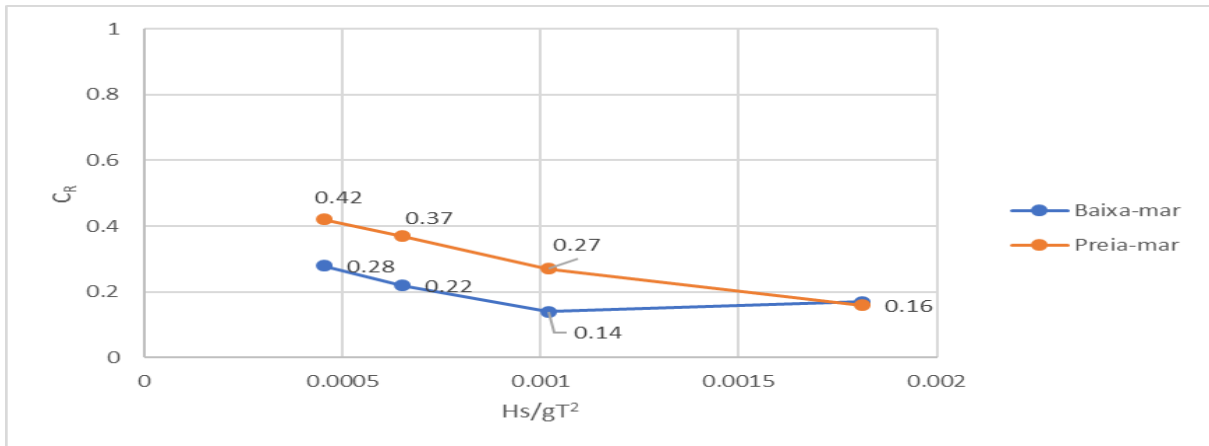


Figura 4.29 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

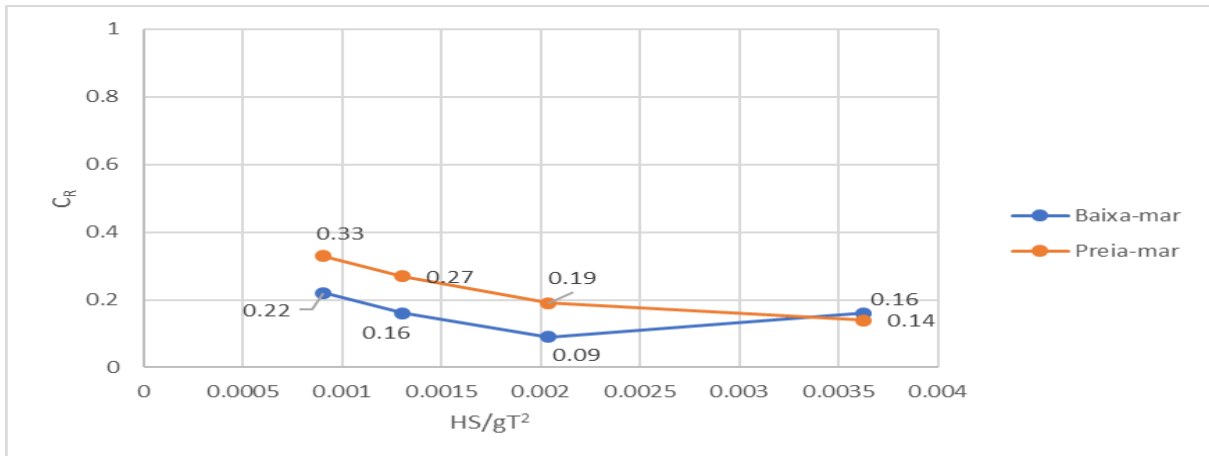


Figura 4.30 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m.

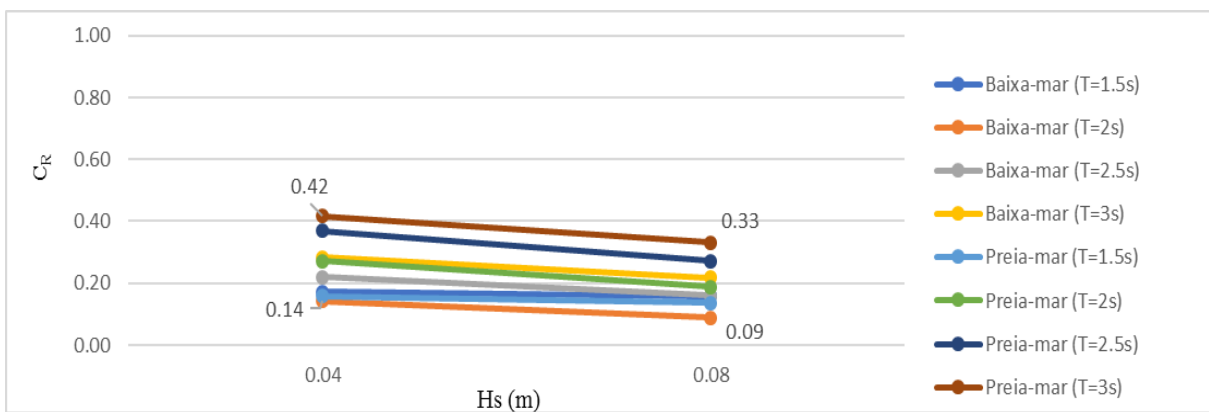


Figura 4.31 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

Para esta configuração foi reduzido o volume de rolhas colocado, tendo obtido um valor de 12.5cm de altura de rolhas colocadas. Neste setup notou-se melhorias para alguns períodos de onda comparados com as configurações anteriores.

Pela Fig. 4.28 pode-se verificar um aumento ligeiro dos coeficientes de reflexão com o aumento do período para todas as condições de agitação, sendo que os níveis de baixa-mar, mais uma vez obtiveram resultados reduzidos do coeficiente de reflexão, dando destaque ao período de pico de 2s que obteve o coeficiente de reflexão mais baixo para altura de onda maior na situação de baixa mar.

A tendência da evolução do traçado continua semelhante as restantes configurações, como se pode verificar nas Fig. 4.29 e 2.30. Os coeficientes de reflexão decrescem com o aumento do parâmetro adimensional, obtendo-se novamente valores mais baixos para a altura de onda significativa maior, para os dois níveis de mare.

Pela Figura 4.31, o aumento da altura de onda, reduz os coeficientes de reflexão para todos os períodos de onda e profundidades de água considerados, pelo que é um parâmetro que influenciou positivamente a redução das reflexões.

4.4.3.5. Configuração 5

Para esta configuração, a Figura 4.32, apresenta a variação dos coeficientes de reflexão em função dos períodos para os dois níveis de maré associados às duas alturas de onda testadas. Na Figura 4.33, está representado o coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a profundidade de 0.30m e na Fig. 4.34, para a profundidade de 0.50m. É ainda apresentado um gráfico na Fig. 4.35, que mostra a evolução do coeficiente de reflexão em função das alturas de onda geradas, 0.04m e 0.08m.

Tabela 4.12 - Coeficientes de Reflexão obtidos para as condições de onda definidas, para a configuração 5 do sistema dissipativo com elementos flutuantes.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.0410	0.0122	0.30
			2	0.0436	0.0154	0.35
			2.5	0.0410	0.0208	0.51
			3	0.0360	0.0210	0.58
		0.08	1.5	0.0783	0.0153	0.20
			2	0.0829	0.0198	0.24
			2.5	0.0847	0.0263	0.31
			3	0.0741	0.0325	0.44
	0.5	0.04	1.5	0.0382	0.0085	0.22
			2	0.0411	0.0112	0.27
			2.5	0.0396	0.0153	0.39
			3	0.0378	0.0189	0.50
		0.08	1.5	0.0799	0.0186	0.23
			2	0.0812	0.0222	0.27
			2.5	0.0777	0.0298	0.38
			3	0.0803	0.0336	0.42

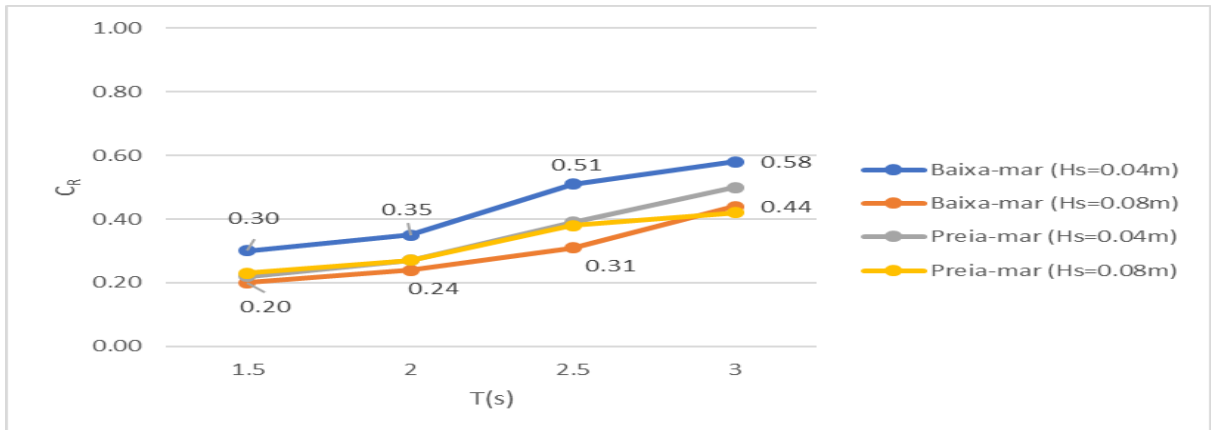


Figura 4.32 - Variação do coeficiente de reflexão segundo o período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

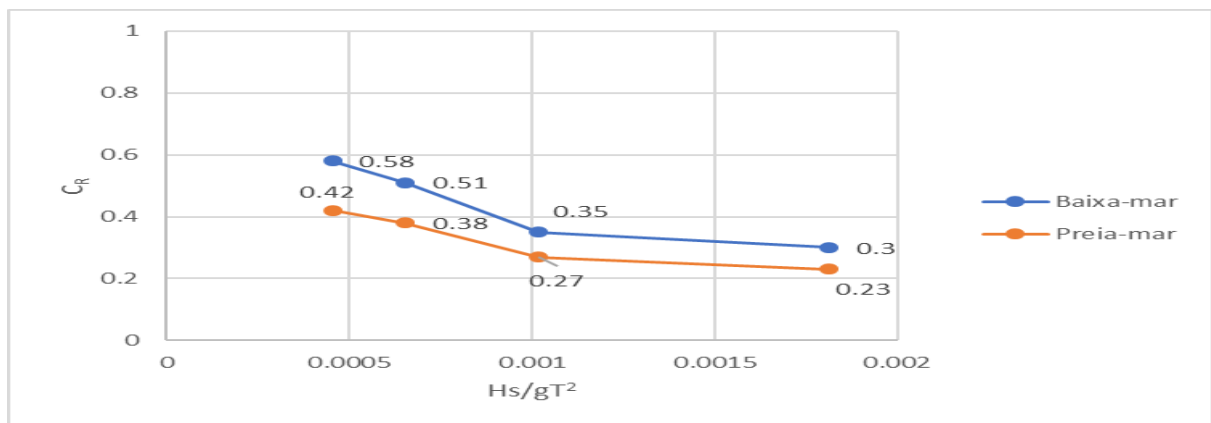


Figura 4.33 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04 m.

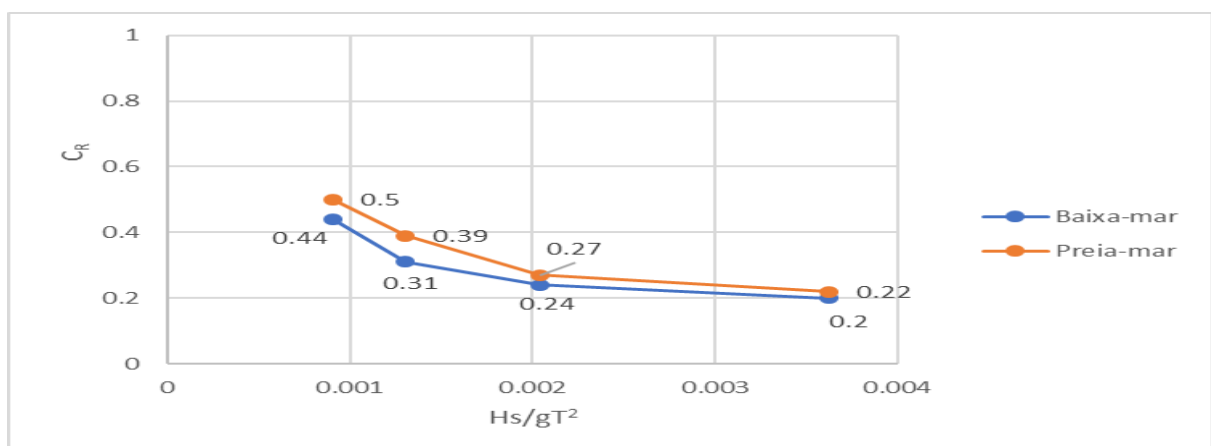


Figura 4.34 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08 m

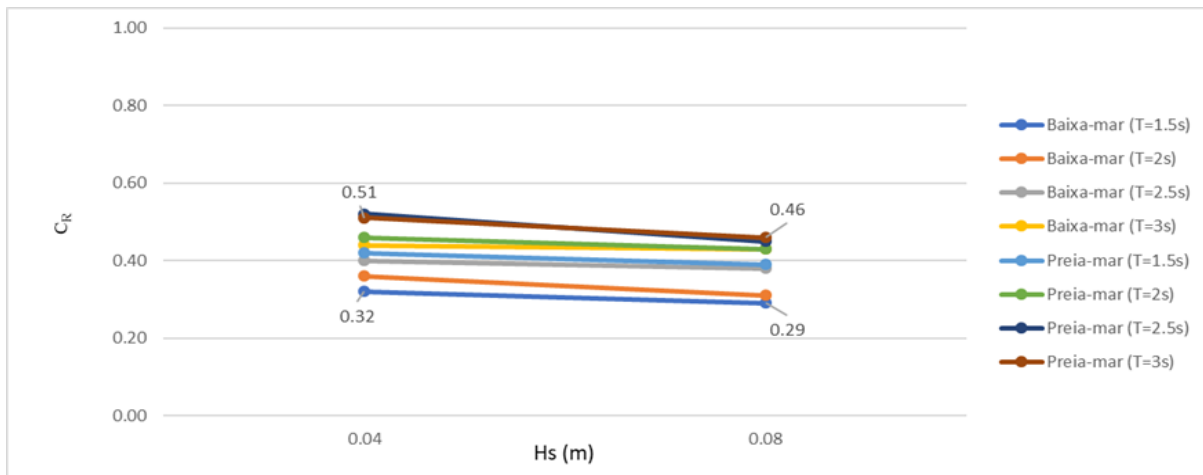


Figura 4.35 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para a situação de baixa-mar (profundidade igual a 0.30m).

Para esta configuração, foi interessante analisar o comportamento da estrutura com o mesmo setup, no entanto a posição da camada de rolhas foi alterada para barlar da estrutura. Os resultados obtidos dos coeficientes de reflexão subiram comparados com as outras configurações, pode ser justificado pelas reflexões resultantes do impacto da onda com as arestas da estrutura base, bem como a barreira de rolhas que apesar de ter um volume reduzido, ao estar a barlar pode ter influenciado um pouco os resultados. As restantes grelhas, apesar de os valores serem mais altos, contribuíram de alguma forma para dissipar grande parte da energia incidente.

Pela Figura 4.32, verifica-se um comportamento semelhante às restantes configurações. Um aumento dos valores do coeficiente de reflexão com o aumento do período de pico, bem como valores mais reduzido para o cenário de baixa-mar.

Na Figura 4.33, a diferença dos coeficientes de reflexão em função do parâmetro adimensional para os dois níveis de maré é muito maior comparado com o que se observa na Fig. 4.34. Aqui, a diferença dos coeficientes de reflexão para os traçados dos dois níveis de maré é praticamente igual. No entanto os valores dos coeficientes de reflexão para a altura de onda significativa de 0,08m são menores que para a altura de onda significativa de 0,04 m. Na Figura 4.35 pode-se ver que o aumento da altura significativa da onda também conduziu a reflexões menores, no entanto a redução fez-se de uma forma muito subtil.

Esta configuração apesar de não ter tido um comportamento satisfatório para controlar as reflexões no interior do tanque, deu para entender o seu funcionamento e de que maneira é que se poderia melhorar a configuração para desenvolvimentos futuros.

4.4.4. ANÁLISE COMPARATIVA

4.4.4.1. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs. Grelhas de Metal Distendido

Na Figura 4.36 apresenta-se o gráfico para as condições de baixa-mar em função do período, para as configurações de metal distendido quando comparado com a estrutura vertical opaca e para a Figura 4.37, para as condições de preia-mar.

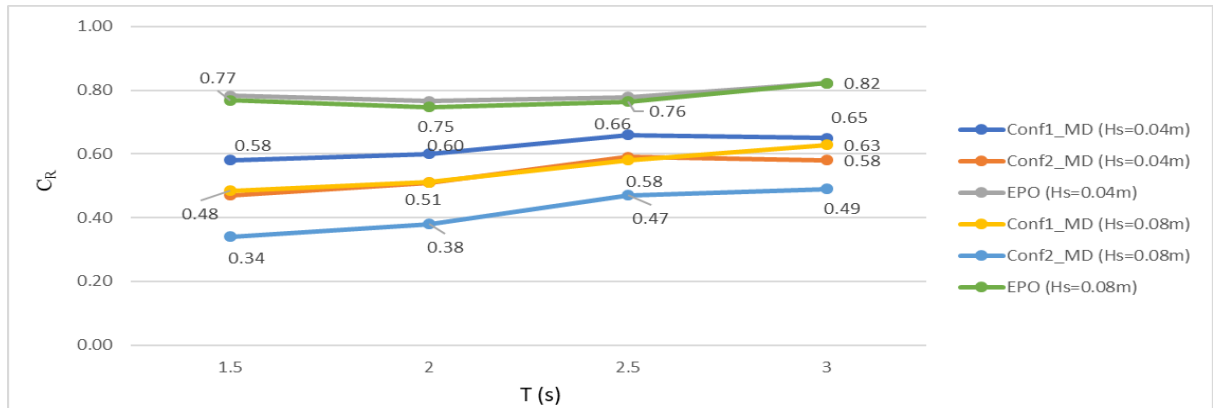


Figura 4.36 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.

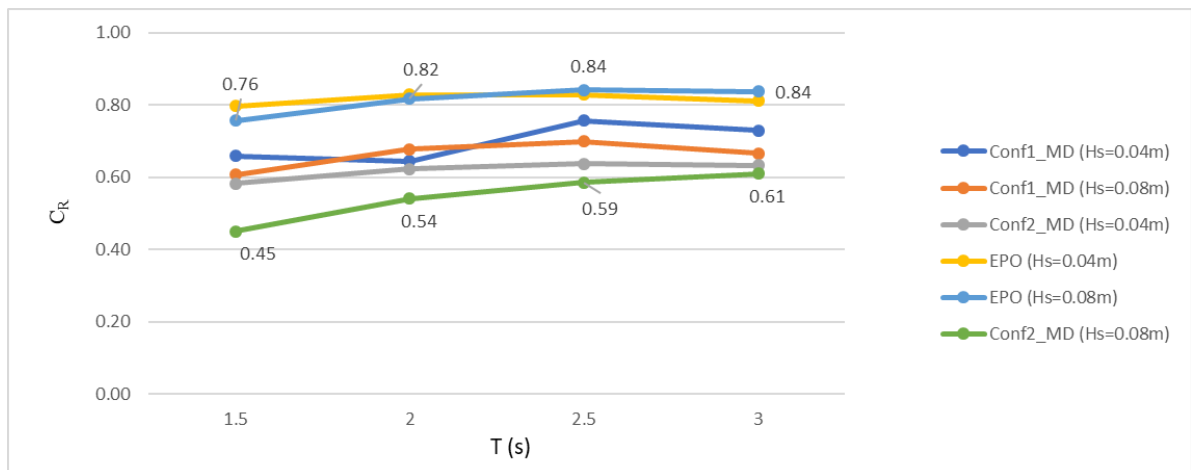


Figura 4.37 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de preia-mar.

Pela análise da Figura 4.36 e 4.37 pode-se verificar que existe uma configuração que se destaca das outras para os dois níveis de água. A configuração 2 para uma altura significativa da onda de 0.08 m foi de longe a que se comportou melhor para este cenário, no entanto com resultados bastante longe do pretendido. O facto de se terem diminuído os espaçamentos e adicionado uma grelha fez com que a estrutura dissipadora se tornasse mais eficiente para absorver as ondas maiores. No entanto para a altura da onda significativa de 0.04 m o comportamento foi semelhante ao da configuração 1 para esta série de ensaios, não tendo obtido resultados tão bons.

Comparativamente com a estrutura completamente refletora, obteve-se uma redução dos coeficientes de reflexão da configuração 1 e da configuração 2, de aproximadamente 20% e 30%, respetivamente.

4.4.4.2. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs Elementos Flutuantes

Na Figura 4.38 apresenta-se o gráfico para as condições de baixa-mar em função do período, para as configurações utilizando uma câmara com elementos flutuantes quando comparado com a estrutura vertical opaca e para a Figura 4.39, para as condições de preia-mar.

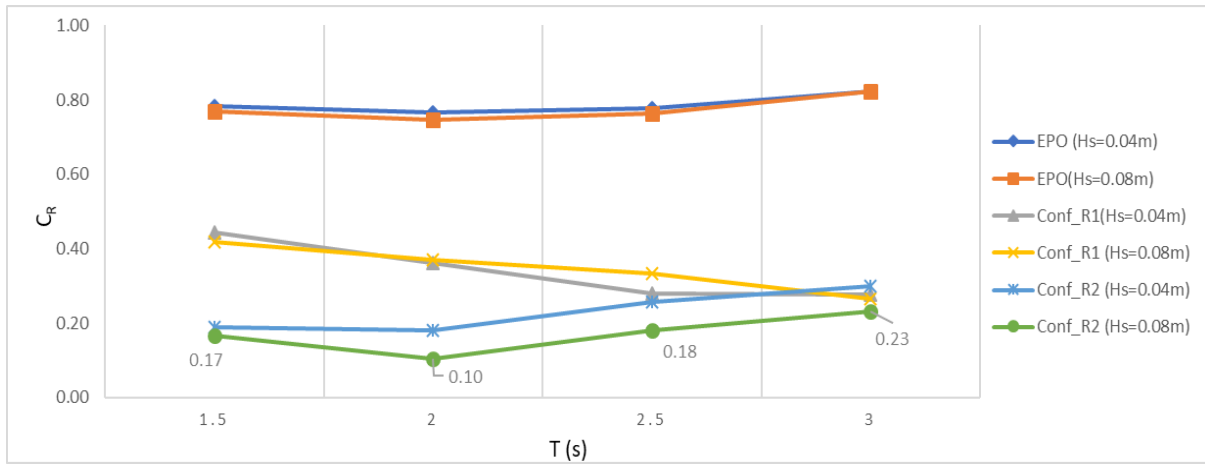


Figura 4.38 - Análise Comparativa das configurações de elementos flutuantes com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.

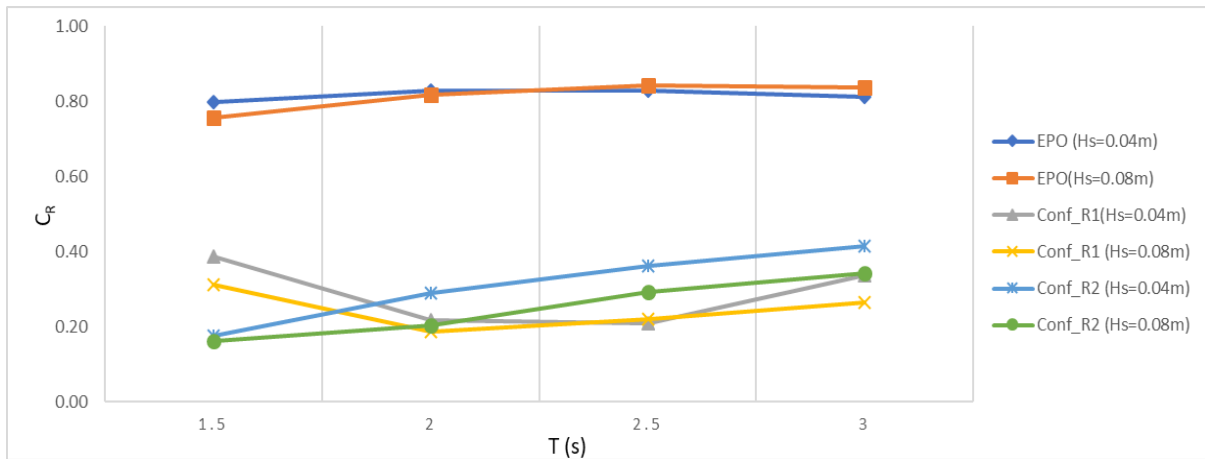


Figura 4.39 - Análise Comparativa das configurações de elementos flutuantes com a placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de preia-mar.

Pela análise das Figuras 4.38 e 4.39 pode-se verificar uma semelhança de resultados quando se compara a configuração 1 da configuração 2 para a série utilizando os elementos flutuantes. A diferença entre estas duas resumiu-se num decréscimo da quantidade de elementos flutuantes utilizado entre o primeiro e o segundo setup. Pode-se entender que para baixa-mar a estrutura que melhor se comportou foi a configuração 2 para a altura de onda mais elevada. Isto pode querer dizer que, para alturas significativas da onda maiores, a camada flutuante é mais eficaz a profundidades mais baixas que para profundidades maiores, embora se verifique que para o período de pico menor em preia-mar, o melhor comportamento. No global as duas configurações tiveram um comportamento muito bom à reflexão, tendo obtido reduções de 65% a 70%.

4.4.4.3. Estrutura Vertical Opaca de Acrílico vs. Elementos Flutuantes + Grelhas de Metal distendido

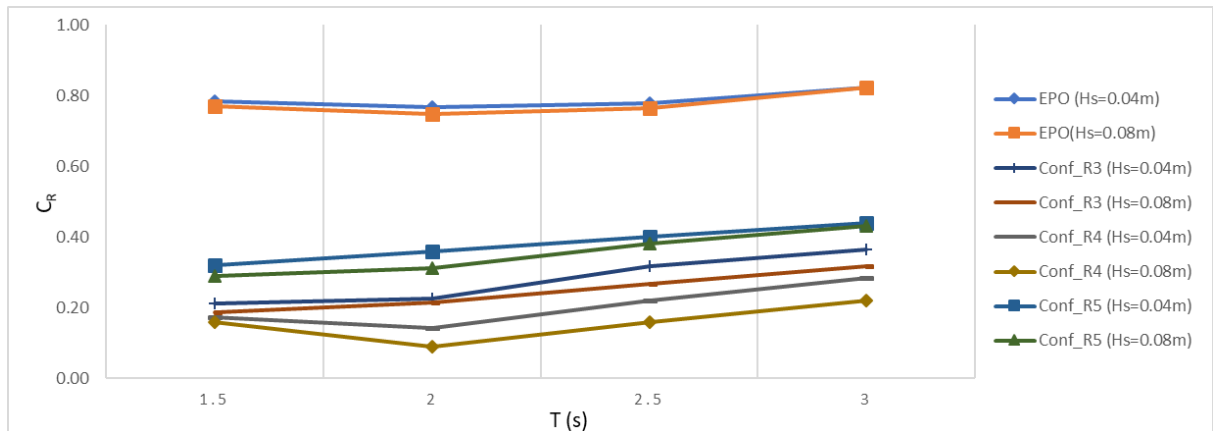


Figura 4.40 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido combinados com elementos flutuantes em relação à placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.

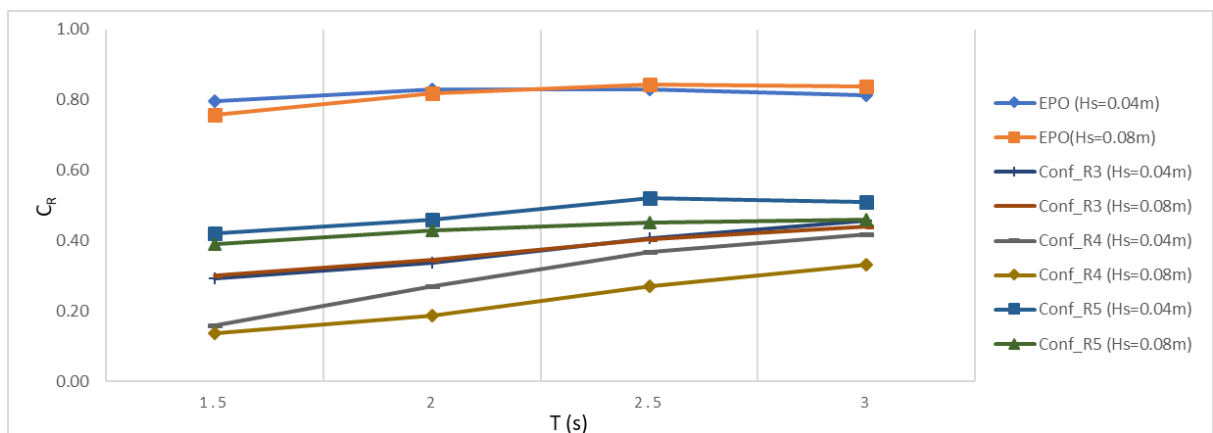


Figura 4.41 - Análise Comparativa das configurações de metal distendido combinados com elementos flutuantes em relação à placa opaca vertical e, em função do período, para o nível de baixa-mar.

Pela análise dos gráficos 4.40 e 4.41, pode-se verificar uma tendência crescente do coeficiente de reflexão. No entanto a configuração 4 foi a que obteve melhores resultados para os dois níveis de água. A configuração 5, por outro lado obteve reflexões próximas das configurações, utilizando apenas grelhas de metal distendido, pelo que por esta análise podemos compreender que a camada flutuante inserida a barlar da estrutura pouca influência tem na redução das reflexões.

Comparativamente com a placa vertical opaca, para as três soluções mistas com elementos flutuantes, obteve-se uma redução de 60.4% para a configuração 3, uma redução de 72.2% para a configuração 4 e 48% para a configuração 5.

Pode-se concluir que a solução mais eficiente de todas as configurações foi a configuração 4. Onde se utilizou uma solução mista, combinando as grelhas verticais com uma câmara a sotamar da estrutura com uma quantidade de rolhas com uma altura de aproximadamente 15cm.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Com o presente estudo pretendeu-se, principalmente, avaliar o comportamento à reflexão de várias configurações de um sistema de absorção da energia das ondas incidentes do tipo passivo e analisar a influência dos elementos colocados no interior da estrutura para resolver os problemas das reflexões indesejadas existentes frequentemente em laboratório. Algumas configurações foram baseadas noutras já existentes, mas com uma estrutura de base dimensionada de modo a otimizar o espaço útil do tanque de ondas. Outras configurações têm um carácter mais inovador pela utilização de elementos cilíndricos flutuantes fabricados com cortiça de diferentes dimensões.

Os resultados obtidos através do trabalho experimental (analisados no capítulo 4) permitiram avaliar o comportamento dessas estruturas em relação à reflexão, de modo a minimizar este fenómeno nos tanques de ondas. Para tal, foram realizadas três séries de ensaios. A primeira avaliou-se o comportamento à reflexão de uma estrutura completamente refletora, materializada com uma placa vertical opaca de acrílico colocada na sua parte traseira. Na segunda série, à estrutura base foram adicionadas grelhas de porosidade e espaçamentos decrescentes no sentido de barlar para sotamar. Numa terceira série de ensaios foram criadas câmaras internas na estrutura às quais foram posteriormente preenchidas com elementos flutuantes. Por fim, foram ainda estudadas combinações entre grelhas de metal distendido e elementos flutuantes.

Para os dois níveis de maré estudados, correspondentes ao nível de baixa-mar e de preia-mar, os resultados obtidos foram particularmente diferentes. Das várias conclusões obtidas é possível destacar as seguintes:

- Para todas as configurações, verifica-se uma melhoria do comportamento à reflexão, à medida que a altura significativa da onda aumenta;
- Para a situação de baixa-mar o coeficiente de reflexão diminui com o aumento da altura significativa e com o aumento do período de pico;
- Para a situação de preia-mar não se verificam melhorias significativas para os vários tipos de condição de agitação, a não ser na configuração 1 da série de testes com elementos flutuantes que se comportou melhor à reflexão que as restantes configurações;
- Quanto menor o período de pico, melhor comportamento as configurações têm à reflexão;

- Ao colocar mais grelhas e reduzir os espaçamentos entre elas, melhores são os resultados obtidos;
- Reduzindo a quantidade de elementos flutuantes a colocar na câmara, melhores resultados se obtêm para os coeficientes de reflexão.

Tendo este trabalho sido desenvolvido com o fim de chegar a um método que contorne os problemas associados pela ocorrência de reflexões em tanques de ondas, evitando a utilização de praias dissipadoras, que ocupam muito espaço, pode-se dizer que se obtiveram bons resultados para chegar ao objetivo pretendido e encontrar um dissipador passivo que apresente coeficientes de reflexão igualmente baixos.

Pela análise elaborada, a que se aproxima mais do objetivo pretendido é a configuração 4 da série de elementos flutuantes. Relembrando, nesta configuração constitui-se por ser uma solução mista, compreendendo 6 grelhas de metal distendido de vários tipos e porosidades, colocadas na vertical e espaçadas umas das outras e uma camada fina de elementos cilíndricos (rolhas de cortiça) para servir como amortecedor da onda.

O efeito da camada fina, permitiu não só dissipar a energia da onda nos pontos onde esta tinha oscilação vertical máxima como também onde a sua oscilação horizontal era máxima. O facto de a camada estar posicionada horizontalmente sobre a superfície da água, acaba por funcionar como um amortecedor assim que a onda incide, dissipando a energia. A camada flutuante, ao estar parcialmente submersa também tem grande influência na dissipação da energia proveniente das oscilações horizontais. Estas ao incidirem na camada, percorrem o caminho de vazios provocado pela colocação aleatória das rolhas na camada (rugosidade) e acabam também por dissipar parte da energia. As grelhas de metal distendido na verdade não tiveram grande impacto na redução dos coeficientes de reflexão. Para que tal acontecesse, era necessário a colocação de mais grelhas verticais e de porosidades menores para que se conseguisse chegar a coeficientes de reflexão mais próximos dos pretendidos (5% - 20%)

As soluções utilizando apenas metal distendido podiam ter apresentado melhores resultados se tivesse sido utilizado um maior número de placas e as grelhas tivessem porosidades menores. As porosidades de algumas grelhas disponibilizadas eram muito semelhantes, o que acabou por não permitir chegar por completo ao conceito de sistema de dissipação progressiva das ondas, que tinha como intuito reduzir progressivamente a porosidade das grelhas.

As restantes soluções utilizando elementos flutuantes foram satisfatórias. Notou-se que a utilização de uma grande quantidade de rolhas não é a melhor solução, pois em vez de dissipar a energia da onda, esta solução reflecte grande parte dessa energia. Uma camada sem ter uma profundidade submersa suficientemente equilibrada, não trás bons resultados pois não há dissipação de energia proveniente da oscilação horizontal da onda.

Comparando estas configurações com a praia neste momento presente no tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP, pode-se dizer que é uma solução excelente em termos de:

- Durabilidade – tanto a pedra como os materiais referenciados na construção das configurações têm uma durabilidade semelhante não requisitando de muita manutenção;
- Flexibilidade e leveza – ao ser construído em moldes, e o facto de ser leve, permite uma maior agilidade ao ser deslocado de um local para outro;
- Espaço – o espaço ocupado por este sistema dissipativo é muito menor. Comparando com o comprimento da praia dissipador atualmente existente no laboratório de Hidráulica da FEUP, o tanque ganha aproximadamente 6m de comprimento.

Porém a partir destas, existem muitas outras configurações que poderiam ser feitas com o intuito de melhorar as que foram referidas neste documento, no entanto por alguns imprevisto que ocorream durante o tempo estipulado para a realização de ensaios, não foi possível concretizar e testar mais configurações para além destas.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De modo a complementar, o trabalho realizado nesta dissertação são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Algumas melhorias sugeridas serão então apresentadas nos seguintes pontos, nomeadamente:

- Para tornar a estrutura mais eficiente utilizando as grelhas de metal distendido, sugere-se a colocação de um maior número de elementos deste material e com porosidades mais variadas bem como a utilização de espaçamentos menores a sotamar da estrutura, de modo a condensar um pouco mais o processo de dissipação da energia da onda incidente, para que este decorra de forma mais fluida quando a onda passa pelos elementos e conduzir a reflexões menores;
- Procurar avaliar o comportamento à reflexão usando mais do que uma câmara com elementos flutuantes, usando alturas diferentes de camadas, a crescer de barlar para sotamar, para avaliar o comportamento destas, na dissipação da onda incidente;
- Fazer combinações de grelhas verticais no centro, com uma câmara de rolhas a sotamar da estrutura e uma grelha em “V” a barlar da estrutura, sendo que os espaçamentos da grelhas verticais devem ser pequenos, se se utilizar uma estrutura base com as mesmas dimensões;
- Utilização de apenas um tipo de rolha, especialmente uma rolha de tamanho uniforme de modo a que o tamanho dos vazios seja uniforme para permitir que haja fenómenos mais intensos na passagem das partículas de água nos vazios existentes da camada de rolhas;
- Utilização de outro material esponjoso ou poroso que permita absorver ou dissipar a energia da onda incidente, podendo combinar esse material com outros já referido em cima, por exemplo plástico poroso, uma camara preenchida com esponja de poliéster, entre outros;
- Combinar grelhas verticais com grelhas horizontais, sendo que estas últimas devem estar colocadas junto à parede impermeável a sotamar, uma vez que é impossível prever outra localização dos antinodos e o único sítio que é certo é junto à parede;
- Criar uma nova configuração usando grelhas inclinadas: inclinações parabólicas ou de inclinação suave. Nos estudos referenciados no início do documento estas inclinações mostraram ser eficientes. E seria de valor construir uma configuração combinando uma câmara de rolhas sendo esta limitada por uma grelha perfurada disposta com uma inclinação parabólica a sotamar, adicionando grelhas verticais de metal distendido ou outro material de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldock, T.E, Simmonds, D.J, 1999. Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry, *Coastal Engineering*, V.38, 3, pp.167-176, ISSN 0378-3839, [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00046-0).
- Bullock, G. N., Murton, G. J. (1989). *Performance of a wedge-type absorbing wavemaker*. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, n. 115, p. 1 -17. [Citado por Carneiro, 2012]
- CARNEIRO, M.L. (2012). *Desenvolvimento de Sistema de controle para geração e absorção ativa de ondas em tanque de ensaios de estruturas oceânicas*, Tese de Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Chwang, A. T. & Dong, Z., (1984). *Wave trapping due to a porous plate*, Proc. 15th Symp. on Naval Hydrodynamics, p. 407-417.
- Costa, Valentim M.S., (2016). *Avaliação do Risco para a Navegação Portuária. Porto da Praia da Vitória, Açores*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Especialização de Hidráulica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*, New Jersey: Prentice-Hall. [Citado por Carneiro, 2012]
- Frigaard, P., Brorsen, M., 1995. A time-domain method for separating incident and reflected irregular waves, *Coastal Engineering*, V.24, 3-4, pp.205-215, ISSN 0378-3839, [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)00035-V](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)00035-V).
- Funke E.R. and Mansard E.P.D.,1987. *A Rationale for the Use of the Deterministic Approach to Laboratory Wave Generation*, Proc. XXII IAHR Congress, Lausanne, Switzerland.
- Funke, E. R., and Mansard, E. P. (1979). *On the Synthesis of Realistic Sea States in a Laboratory Flume*, Hydraulics Laboratory Technical Report LTR-HY-66, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- Goda, Y. & Ippen, A. T., (1963). *Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipators composed of wire mesh screens*, Hydrodynamics Laboratory Report No.60, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Hughes, S. A.,1993. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore, Vol.7. ISBN:981-02-1541-X.
- Ikeya, T. (1991). *Active directional wave absorption theory*, report TM91-02, Kajama Technical Research Institute, Tokyo. [Citado por Carneiro, 2012]
- Kawaguchi, T. (1986). *Absorbing wave making system with wave sensor and velocity control*. *Mitsui Zosen Technical Review*, v. 126, p. 20 – 24. [Citado por Carneiro, 2012]
- Le Méhauté, B. (1971). *Progressive Wave Absorber*, Tetra Tech. Inc., Pasadena, Califórnia, U.S.A.
- Lean, G. H., (1967). *A simplified theory of permeable wave absorbers*, *Journal of Hydraulic Research*, Vol 5, No.1, p. 15-30.
- Milgram, J. H. (1970). *Active water wave absorbers*. *J. Fluid Mech*, v. 43, n. 4, p. 845-859. [Citado por Carneiro, 2012]

- Oliveira Pinto, S., (2012). *Estruturas portuárias verticais perfuradas. Dimensionamento e avaliação experimental*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- P.A. Madsen. (1983) *Wave reflection from a vertical permeable wave absorber*. *Coastal Engineering* 7:4, pages 381-396. [Citado por Hughes, 1993]
- Pinto, F.T. (2001). *Análise das oscilações e dos campos de velocidade nas proximidades de quebramares submersos sob a ação da agitação marítima*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Ploeg, J., Jamieson, W.W. 1989, *Water wave absorber*, US Patent 4836709 A (<https://www.google.ch/patents/US4836709>).
- S.W. Twu, C.C. Liu. (1995) *A theoretical study on a permanent wavefilter*. *Ocean Engineering* 22:2, pages 191-206. [Citado por Hughes, 1993]
- Santos, P. (2010). *Análise da interacção de navios com dispositivos de acostagem e amarração. estudo em modelo físico do posto "a" do terminal de petroleiros do porto de leixões*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Schäffer, H. A. (2001). *Active wave absorption in flumes and 3D basins*. *Waves '01: Proc. 4th Int. Symp. On Ocean Wave Measurement and Analysis*, ASCE, San Francisco, USA, p. 1200 – 1208. [Citado por Carneiro, 2012]
- Schäffer, H. A., Skourup, J. (1996). *Active absorption of multidirectional waves*. *Proc. 25th Int. Conf. On Coast. Eng.*, New York. [Citado por Carneiro, 2012]
- Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., Silva, R., Neves, L., Santos, P. R., Lopes, H. G., Neves, A.C. (2007). *O novo sistema de geração e aquisição de agitação marítima do laboratório de hidráulica da FEUP*, 2.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, ISBN 978-989-95557-1-6
- Taylor, J.R.M., Rea, M., Rogers, D.J. (2003). *The Edinburgh curved tank*, Paper from the 5th European Wave Power Conference, School of Engineering & Electronics, University of Edinburgh, Edinburgh Designs Ltd.
- Twu, S. & Lin, D., (1991). *On a highly effective wave absorber*, *Coastal Engineering* (15), p. 389-405.
- Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F., Carneiro de Barros, R., (1996). *Agitação Marítima e Irregular* (Elementos de apoio às aulas da disciplina Trabalhos Marítimos 2). FEUP, Porto, Portugal.
- Wayne W. Jamieson, Etienne P. D. Mansard, 1987. *An efficient upright wave absorber*, National Research Council Canada (<https://books.google.pt/books?id=i-CntgAACAAJ>) [Citado por Hughes, 1993 e por
- Y. Ouellet, I. Datta. (1986) *A survey of wave absorbers*. *Journal of Hydraulic Research* 24:4, pages 265-280. [Citado por Hughes, 1993]

- [1] <http://naviosavista.blogspot.pt/2013/02/recordando-o-naufragio-do-navio-motor.html> (consultado em Setembro de 2017)
- [2] <http://www.homepages.ed.ac.uk/v1ewaveg/curved%20tank/curved%20tank%20working.htm> (consultado em Setembro de 2017)
- [3] http://www.eng.tau.ac.il/research/laboratories/waves/large_flume.html (consultado em Setembro de 2017)
- [4] <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html> (consultado em Maio de 2017)
- [5] http://www.deno.oceanica.ufjf.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/SaraJorge/relat2/index.htm (consultado em Maio de 2017)

ANEXOS

ANEXOS A

Tabelas dos ensaios efetuados

Anexo A 1 - Resultados obtidos para a série de ensaios para a estrutura com placa opaca de acrílico.

Tipo de Agitação	d [m]	H _s [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	T _{ciclo} (s)	Ganho	H _{s,i} [m]	H _{s,r} [m]	Cr [%]
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	1.04	0.0385	0.0308	0.80
			2	0.50		200	0.76	0.0406	0.0291	0.72
			2.5	0.40		250	0.85	0.0415	0.0346	0.83
			3	0.33		300	1.11	0.0382	0.0303	0.79
		0.08	1.5	0.67		150	1.13	0.0798	0.0688	0.86
			2	0.50		200	0.89	0.0824	0.0610	0.74
			2.5	0.40		250	1.07	0.0784	0.0628	0.80
			3	0.33		300	1.39	0.0765	0.0662	0.87
		0.04	1.5	0.67		150	0.96	0.0411	0.0284	0.69
			2	0.50		200	0.56	0.0405	0.0350	0.86
			2.5	0.40		250	0.71	0.0388	0.0379	0.98
			3	0.33		300	1.27	0.0424	0.0315	0.74
	0.5	0.08	1.5	0.67		150	0.92	0.0796	0.0512	0.64
			2	0.50		200	0.57	0.0806	0.0693	0.86
			2.5	0.40		250	0.77	0.0794	0.0697	0.88
			3	0.33		300	1.18	0.0822	0.0648	0.79
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.67	512	768	1.04	0.0396	0.0310	0.78
			2	0.5		1024	1.04	0.0406	0.0311	0.77
			2.5	0.4		1280	1.04	0.0397	0.0309	0.78
			3	0.33		1536	1.37	0.0382	0.0314	0.82
		0.08	1.5	0.67		768	1.17	0.0822	0.0632	0.77
			2	0.5		1024	1.2	0.0828	0.0619	0.75
			2.5	0.4		1280	1.07	0.0788	0.0602	0.76
			3	0.33		1536	1.36	0.0886	0.0729	0.82
		0.04	1.5	0.67		768	1.12	0.0409	0.0326	0.80
			2	0.5		1024	1.12	0.0410	0.0340	0.83
			2.5	0.4		1280	1.12	0.0387	0.0321	0.83
			3	0.33		1536	1.2	0.0398	0.0323	0.81
	0.5	0.08	1.5	0.67		768	1.14	0.0811	0.0614	0.76
			2	0.5		1024	1.08	0.0793	0.0648	0.82
			2.5	0.4		1280	1.2	0.0804	0.0677	0.84
			3	0.33		1536	1.2	0.0771	0.0646	0.84

Anexo A 2 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando metal distendido - Configuração 1.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	T _{ciclo} (s)	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	1.04	0.0387	0.0237	0.61
			2	0.50		200	0.76	0.0401	0.0231	0.58
			2.5	0.40		250	0.85	0.0399	0.0287	0.72
			3	0.33		300	1.11	0.0407	0.0271	0.67
		0.08	1.5	0.67		150	1.13	0.0811	0.0449	0.55
			2	0.50		200	0.89	0.0832	0.0413	0.50
			2.5	0.40		250	1.07	0.0785	0.0517	0.66
			3	0.33		300	1.39	0.0820	0.0494	0.60
		0.04	1.5	0.67		768	1.04	0.0401	0.0234	0.58
			2	0.5		1024	1.04	0.0399	0.0241	0.60
			2.5	0.4		1280	1.04	0.0380	0.0250	0.66
			3	0.33		1536	1.37	0.0382	0.0250	0.65
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.67	512	768	1.17	0.0788	0.0382	0.48
			2	0.5		1024	1.17	0.0794	0.0406	0.51
			2.5	0.4		1280	1.07	0.0781	0.0453	0.58
			3	0.33		1536	1.23	0.0767	0.0482	0.63
		0.08	1.5	0.67		150	1.08	0.0399	0.0262	0.66
			2	0.50		200	0.85	0.0391	0.0284	0.73
			2.5	0.40		250	1.15	0.0385	0.0294	0.76
			3	0.33		300	1.49	0.0409	0.0296	0.72
		0.04	1.5	0.67		150	1.07	0.0805	0.0446	0.55
			2	0.50		200	0.9	0.0771	0.0511	0.66
			2.5	0.40		250	1.3	0.0780	0.0558	0.72
			3	0.33		300	1.3	0.0762	0.0534	0.70
Regular	0.5	0.04	1.5	0.67	100	768	1.12	0.0402	0.0265	0.66
			2	0.5		1024	1.12	0.0394	0.0254	0.64
			2.5	0.4		1280	1.2	0.0395	0.0299	0.76
			3	0.33		1536	1.2	0.0419	0.0306	0.73
		0.08	1.5	0.67		768	1.2	0.0800	0.0486	0.61
			2	0.5		1024	1.08	0.0758	0.0514	0.68
			2.5	0.4		1280	1.35	0.0815	0.0570	0.70
			3	0.33		1536	1.2	0.0798	0.0532	0.67
		0.04	1.5	0.67		768	1.12	0.0402	0.0265	0.66
			2	0.5		1024	1.12	0.0394	0.0254	0.64
			2.5	0.4		1280	1.2	0.0395	0.0299	0.76
			3	0.33		1536	1.2	0.0419	0.0306	0.73
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	1.2	0.0800	0.0486	0.61
			2	0.5		1024	1.08	0.0758	0.0514	0.68
			2.5	0.4		1280	1.35	0.0815	0.0570	0.70
			3	0.33		1536	1.2	0.0798	0.0532	0.67
		0.08	1.5	0.67		768	1.12	0.0402	0.0265	0.66
			2	0.5		1024	1.12	0.0394	0.0254	0.64
			2.5	0.4		1280	1.2	0.0395	0.0299	0.76
			3	0.33		1536	1.2	0.0419	0.0306	0.73
		0.04	1.5	0.67		768	1.2	0.0800	0.0486	0.61
			2	0.5		1024	1.08	0.0758	0.0514	0.68
			2.5	0.4		1280	1.35	0.0815	0.0570	0.70
			3	0.33		1536	1.2	0.0798	0.0532	0.67

Anexo A 3 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando metal distendido - Configuração 2.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	1.04	0.0401	0.0186	0.46
			2	0.50		200	0.76	0.0403	0.0188	0.47
			2.5	0.40		250	0.85	0.0406	0.0249	0.61
			3	0.33		300	1.11	0.0418	0.0241	0.58
		0.08	1.5	0.67		150	1.13	0.0805	0.0306	0.38
			2	0.50		200	0.89	0.0826	0.0280	0.34
			2.5	0.40		250	1.07	0.0773	0.0426	0.55
			3	0.33		300	1.39	0.0799	0.0390	0.49
		0.04	1.5	0.67		768	1.04	0.0401	0.0188	0.47
			2	0.50		1024	1.04	0.0404	0.0205	0.51
			2.5	0.40		1280	1.04	0.0393	0.0231	0.59
			3	0.33		1536	1.4	0.0390	0.0227	0.58
Irregular	0.3	0.08	1.5	0.67	512	768	1.17	0.0807	0.0278	0.34
			2	0.50		1024	1.17	0.0804	0.0307	0.38
			2.5	0.40		1280	1.07	0.0780	0.0364	0.47
			3	0.33		1536	1.23	0.0798	0.0389	0.49
		0.04	1.5	0.67		150	0.82	0.0395	0.0202	0.51
			2	0.50		200	0.55	0.0414	0.0316	0.76
			2.5	0.40		250	0.70	0.0404	0.0317	0.78
			3	0.33		300	1.11	0.0385	0.0204	0.53
		0.08	1.5	0.67		150	0.81	0.0801	0.0342	0.43
			2	0.50		200	0.61	0.0828	0.0597	0.72
			2.5	0.40		250	0.78	0.0831	0.0624	0.75
			3	0.33		300	1.03	0.0795	0.0428	0.54
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	1.04	0.0360	0.0210	0.58
			2	0.50		1024	1.04	0.0372	0.0232	0.62
			2.5	0.40		1280	1.30	0.0383	0.0244	0.64
			3	0.33		1536	1.4	0.0433	0.0274	0.63
		0.08	1.5	0.67		768	1.17	0.0796	0.0359	0.45
			2	0.50		1024	1.17	0.0816	0.0441	0.54
			2.5	0.40		1280	1.3	0.0802	0.0470	0.59
			3	0.33		1536	1.3	0.0779	0.0477	0.61

Anexo A 4 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando elementos flutuantes - Configuração 1.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	0.87	0.0403	0.0182	0.45
			2	0.50		200	0.87	0.0402	0.0138	0.34
			2.5	0.40		250	0.87	0.0372	0.0081	0.22
			3	0.33		300	1.11	0.0412	0.0122	0.30
		0.08	1.5	0.67		150	0.95	0.0784	0.0289	0.37
			2	0.50		200	0.95	0.0820	0.0339	0.41
			2.5	0.40		250	1.1	0.0797	0.0365	0.46
			3	0.33		300	1.2	0.0772	0.0257	0.33
		0.04	1.5	0.67		768	0.9	0.0410	0.0182	0.44
			2	0.5		1024	0.9	0.0437	0.0158	0.36
			2.5	0.4		1280	0.9	0.0436	0.0122	0.28
			3	0.33		1536	1.37	0.0433	0.0120	0.28
Irregular	0.3	0.08	1.5	0.67	512	768	0.9	0.0807	0.0338	0.42
			2	0.5		1024	0.9	0.0784	0.0290	0.37
			2.5	0.4		1280	0.82	0.0796	0.0265	0.33
			3	0.33		1536	0.82	0.0757	0.0200	0.26
		0.04	1.5	0.67		150	0.94	0.0397	0.0124	0.31
			2	0.50		200	0.94	0.0400	0.0040	0.10
			2.5	0.40		250	0.94	0.0378	0.0097	0.26
			3	0.33		300	1.2	0.0395	0.0121	0.31
		0.08	1.5	0.67		150	0.94	0.0806	0.0281	0.35
			2	0.50		200	0.94	0.0779	0.0124	0.16
			2.5	0.40		250	0.94	0.0680	0.0143	0.21
			2.5	0.40		250	1.1	0.0777	0.0155	0.20
Regular	0.5	0.04	3	0.33	100	300	1.3	0.0757	0.0196	0.26
			1.5	0.67		768	1.17	0.0400	0.0155	0.39
			2	0.5		1024	1.17	0.0427	0.0093	0.22
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0418	0.0087	0.21
		0.08	3	0.33		1536	1.17	0.0399	0.0134	0.34
			1.5	0.67		768	1.2	0.0815	0.0253	0.31
			2	0.5		1024	1.2	0.0770	0.0144	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0801	0.0176	0.22
			3	0.33		1536	1.2	0.0778	0.0206	0.26
		0.04	1.5	0.67		768	1.17	0.0400	0.0155	0.39
			2	0.5		1024	1.17	0.0427	0.0093	0.22
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0418	0.0087	0.21
			3	0.33		1536	1.17	0.0399	0.0134	0.34
Irregular	0.5	0.08	1.5	0.67	512	768	1.2	0.0815	0.0253	0.31
			2	0.5		1024	1.2	0.0770	0.0144	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0801	0.0176	0.22
			3	0.33		1536	1.2	0.0778	0.0206	0.26
		0.04	1.5	0.67		768	1.17	0.0400	0.0155	0.39
			2	0.5		1024	1.17	0.0427	0.0093	0.22
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0418	0.0087	0.21
			3	0.33		1536	1.17	0.0399	0.0134	0.34
		0.08	1.5	0.67		768	1.2	0.0815	0.0253	0.31
			2	0.5		1024	1.2	0.0770	0.0144	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0801	0.0176	0.22
			3	0.33		1536	1.2	0.0778	0.0206	0.26

Anexo A 5 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando elementos flutuantes - Configuração 2.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	0.87	0.0366	0.0047	0.13
			2	0.50		200	0.87	0.0409	0.0059	0.14
			2.5	0.40		250	0.87	0.0368	0.0098	0.27
			3	0.33		300	1.11	0.0414	0.0140	0.34
		0.08	1.5	0.67		150	1.03	0.0776	0.0082	0.11
			2	0.50		200	0.9	0.0807	0.0074	0.09
			2.5	0.40		250	1.2	0.0764	0.0132	0.17
			3	0.33		300	1.2	0.0849	0.0191	0.22
		0.04	1.5	0.67		768	0.9	0.0356	0.0067	0.19
			2	0.5		1024	0.9	0.0356	0.0064	0.18
			2.5	0.4		1280	1.11	0.0399	0.0102	0.26
			3	0.33		1536	1.37	0.0379	0.0113	0.30
Irregular	0.3	0.08	1.5	0.67	512	768	1.06	0.0777	0.0130	0.17
			2	0.5		1024	1.06	0.0775	0.0081	0.10
			2.5	0.4		1280	1.06	0.0781	0.0140	0.18
			3	0.33		1536	0.82	0.0754	0.0174	0.23
		0.04	1.5	0.67		150	0.94	0.0386	0.0060	0.16
			2	0.50		200	0.94	0.0422	0.0113	0.27
			2.5	0.40		250	1.10	0.0400	0.0150	0.38
			3	0.33		300	1.2	0.0364	0.0144	0.40
		0.08	1.5	0.67		150	0.94	0.0770	0.0081	0.11
			2	0.50		200	0.94	0.0785	0.0154	0.20
			2.5	0.40		250	1.1	0.0796	0.0231	0.29
			3	0.33		300	1.3	0.0794	0.0263	0.33
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	1.17	0.0409	0.0072	0.18
			2	0.5		1024	1.17	0.0407	0.0118	0.29
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0417	0.0151	0.36
			3	0.33		1536	1.17	0.0359	0.0149	0.42
		0.08	1.5	0.67		768	1.2	0.0832	0.0134	0.16
			2	0.5		1024	1.2	0.0831	0.0169	0.20
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0778	0.0228	0.29
			3	0.33		1536	1.2	0.0798	0.0273	0.34

Anexo A 6 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando elementos flutuantes - Configuração 3.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	0.87	0.0382	0.0059	0.15
			2	0.50		200	0.87	0.0393	0.0102	0.26
			2.5	0.40		250	0.87	0.0350	0.0123	0.35
			3	0.33		300	1.11	0.0400	0.0155	0.39
		0.08	1.5	0.67		150	1.03	0.0813	0.0170	0.21
			2	0.50		200	0.9	0.0776	0.0193	0.25
			2.5	0.40		250	1.2	0.0720	0.0286	0.40
			3	0.33		300	1.2	0.0842	0.0194	0.23
		0.04	1.5	0.67		150	0.9	0.0362	0.0076	0.21
			2	0.5		200	0.9	0.0355	0.0080	0.23
			2.5	0.4		250	1.11	0.0389	0.0123	0.32
			3	0.33		300	1.11	0.0391	0.0142	0.36
Irregular	0.3	0.08	1.5	0.67	512	150	1.06	0.0785	0.0145	0.19
			2	0.5		200	1.06	0.0758	0.0163	0.21
			2.5	0.4		250	1.06	0.0753	0.0202	0.27
			3	0.33		300	1.06	0.0783	0.0248	0.32
		0.04	1.5	0.67		150	0.94	0.0417	0.0119	0.29
			2	0.50		200	0.94	0.0410	0.0123	0.30
			2.5	0.40		250	0.94	0.0395	0.0167	0.42
			3	0.33		300	1.2	0.0378	0.0182	0.48
		0.08	1.5	0.67		150	0.94	0.0798	0.0212	0.27
			2	0.50		200	0.94	0.0802	0.0255	0.32
			2.5	0.40		250	1.1	0.0822	0.0312	0.38
			3	0.33		300	1.3	0.0798	0.0365	0.46
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	0.94	0.0422	0.0124	0.29
			2	0.5		1024	1.17	0.0412	0.0140	0.34
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0434	0.0177	0.41
			3	0.33		1536	1.17	0.0370	0.0160	0.46
		0.08	1.5	0.67		768	1.13	0.0806	0.0242	0.30
			2	0.5		1024	1.13	0.0779	0.0269	0.35
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0818	0.0330	0.40
			3	0.33		1536	1.3	0.0820	0.0366	0.45

Anexo A 7 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando elementos flutuantes - Configuração 4.

Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	0.87	0.0375	0.0023	0.06
			2	0.50		200	0.87	0.0407	0.0067	0.16
			2.5	0.40		250	0.87	0.0365	0.0097	0.27
			3	0.33		300	1.11	0.0414	0.0142	0.34
		0.08	1.5	0.67		150	1.03	0.0797	0.0125	0.16
			2	0.50		200	0.9	0.0801	0.0088	0.11
			2.5	0.40		250	1.2	0.0752	0.0136	0.18
			3	0.33		300	1.2	0.0796	0.0172	0.22
		0.04	1.5	0.67		768	0.9	0.0356	0.0061	0.17
			2	0.5		1024	0.9	0.0351	0.0050	0.14
			2.5	0.4		1280	1.11	0.0404	0.0089	0.22
			3	0.33		1536	1.11	0.0408	0.0116	0.28
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.67	512	768	1.14	0.0833	0.0132	0.16
			2	0.5		1024	1.14	0.0825	0.0073	0.09
			2.5	0.4		1280	1.14	0.0835	0.0133	0.16
			3	0.33		1536	1.14	0.0828	0.0181	0.22
		0.08	1.5	0.67		150	0.94	0.0382	0.0042	0.11
			2	0.50		200	0.94	0.0416	0.0104	0.25
			2.5	0.40		250	1.10	0.0402	0.0141	0.35
			3	0.33		300	1.2	0.0359	0.0141	0.39
		0.04	1.5	0.67		150	0.94	0.0774	0.0048	0.06
			2	0.50		200	0.94	0.0778	0.0146	0.19
			2.5	0.40		250	1.2	0.0793	0.0213	0.27
			3	0.33		300	1.3	0.0789	0.0262	0.33
Regular	0.5	0.04	1.5	0.67	100	768	1.17	0.0423	0.0067	0.16
			2	0.5		1024	1.17	0.0416	0.0113	0.27
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0431	0.0159	0.37
			3	0.33		1536	1.17	0.0367	0.0153	0.42
		0.08	1.5	0.67		768	1.13	0.0802	0.0110	0.14
			2	0.5		1024	1.13	0.0788	0.0148	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0796	0.0216	0.27
			3	0.33		1536	1.2	0.0749	0.0248	0.33
		0.04	1.5	0.67		768	1.17	0.0423	0.0067	0.16
			2	0.5		1024	1.17	0.0416	0.0113	0.27
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0431	0.0159	0.37
			3	0.33		1536	1.17	0.0367	0.0153	0.42
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	1.13	0.0802	0.0110	0.14
			2	0.5		1024	1.13	0.0788	0.0148	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0796	0.0216	0.27
			3	0.33		1536	1.2	0.0749	0.0248	0.33
		0.08	1.5	0.67		768	1.17	0.0423	0.0067	0.16
			2	0.5		1024	1.17	0.0416	0.0113	0.27
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0431	0.0159	0.37
			3	0.33		1536	1.17	0.0367	0.0153	0.42
		0.04	1.5	0.67		768	1.13	0.0802	0.0110	0.14
			2	0.5		1024	1.13	0.0788	0.0148	0.19
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0796	0.0216	0.27
			3	0.33		1536	1.2	0.0749	0.0248	0.33

Anexo A 8 - Resultados obtidos para a série de ensaios usando elementos flutuantes - Configuração 5.

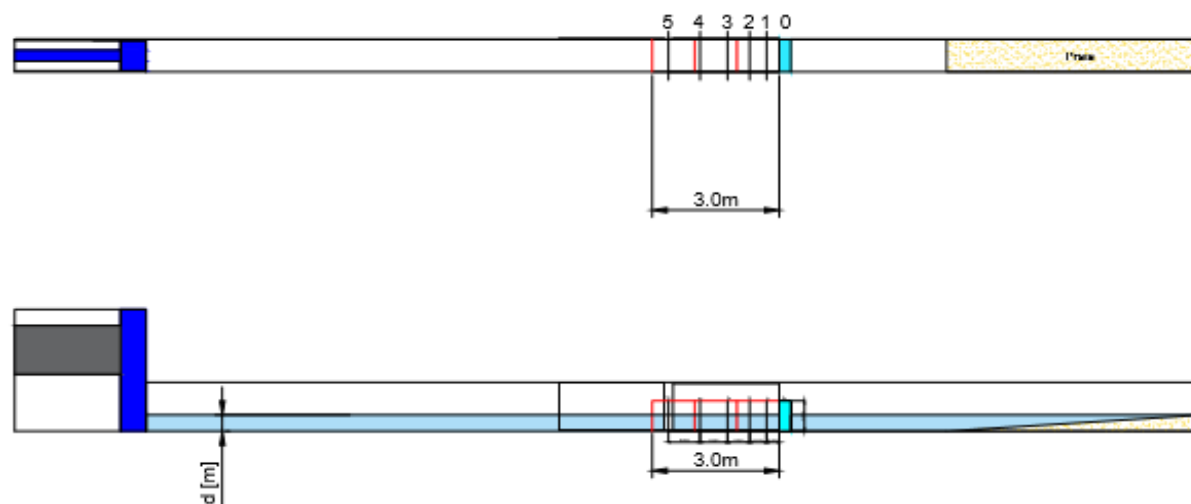
Tipo de Agitação	d [m]	Hs [m]	T [s]	f [Hz]	Número de ondas	Tciclo [s]	Ganho	Hs,i [m]	Hs,r [m]	Cr
Regular	0.3	0.04	1.5	0.67	100	150	0.87	0.0398	0.0132	0.33
			2	0.50		200	0.87	0.0412	0.0165	0.40
			2.5	0.40		250	0.87	0.0377	0.0145	0.38
			3	0.33		300	1.11	0.0408	0.0174	0.43
		0.08	1.5	0.67		150	1.03	0.0811	0.0196	0.24
			2	0.50		200	0.9	0.0788	0.0234	0.30
			2.5	0.40		250	1.2	0.0801	0.0245	0.31
			3	0.33		300	1.2	0.0799	0.0298	0.37
		0.04	1.5	0.67		768	1.1	0.0377	0.0112	0.32
			2	0.5		1024	1.1	0.0398	0.0142	0.36
			2.5	0.4		1280	1.11	0.0422	0.0169	0.40
			3	0.33		1536	1.11	0.0401	0.0175	0.44
Irregular	0.3	0.04	1.5	0.67	512	768	1.14	0.0788	0.0210	0.29
			2	0.5		1024	1.14	0.0802	0.0298	0.31
			2.5	0.4		1280	1.14	0.0821	0.0310	0.38
			3	0.33		1536	1.14	0.0799	0.0342	0.43
		0.08	1.5	0.67		150	0.94	0.0370	0.0128	0.35
			2	0.50		200	0.94	0.0411	0.0132	0.32
			2.5	0.40		250	1.10	0.0396	0.0169	0.43
			3	0.33		300	1.2	0.0402	0.0199	0.50
		0.04	1.5	0.67		150	0.94	0.0823	0.0231	0.28
			2	0.50		200	0.94	0.0801	0.0302	0.38
			2.5	0.40		250	1.2	0.0788	0.0311	0.39
			3	0.33		300	1.3	0.0785	0.0350	0.45
Regular	0.5	0.04	1.5	0.67	100	768	1.17	0.0390	0.0122	0.42
			2	0.5		1024	1.17	0.0378	0.0142	0.46
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0403	0.0165	0.52
			3	0.33		1536	1.17	0.0421	0.0188	0.51
		0.08	1.5	0.67		768	1.13	0.0822	0.0245	0.39
			2	0.5		1024	1.13	0.0801	0.0269	0.43
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0769	0.0312	0.45
			3	0.33		1536	1.2	0.0799	0.0366	0.46
Irregular	0.5	0.04	1.5	0.67	512	768	1.17	0.0390	0.0122	0.42
			2	0.5		1024	1.17	0.0378	0.0142	0.46
			2.5	0.4		1280	1.17	0.0403	0.0165	0.52
			3	0.33		1536	1.17	0.0421	0.0188	0.51
		0.08	1.5	0.67		768	1.13	0.0822	0.0245	0.39
			2	0.5		1024	1.13	0.0801	0.0269	0.43
			2.5	0.4		1280	1.13	0.0769	0.0312	0.45
			3	0.33		1536	1.2	0.0799	0.0366	0.46

ANEXOS B

Esquemas das configurações ensaiadas

Configuração 1 - Metal distendido

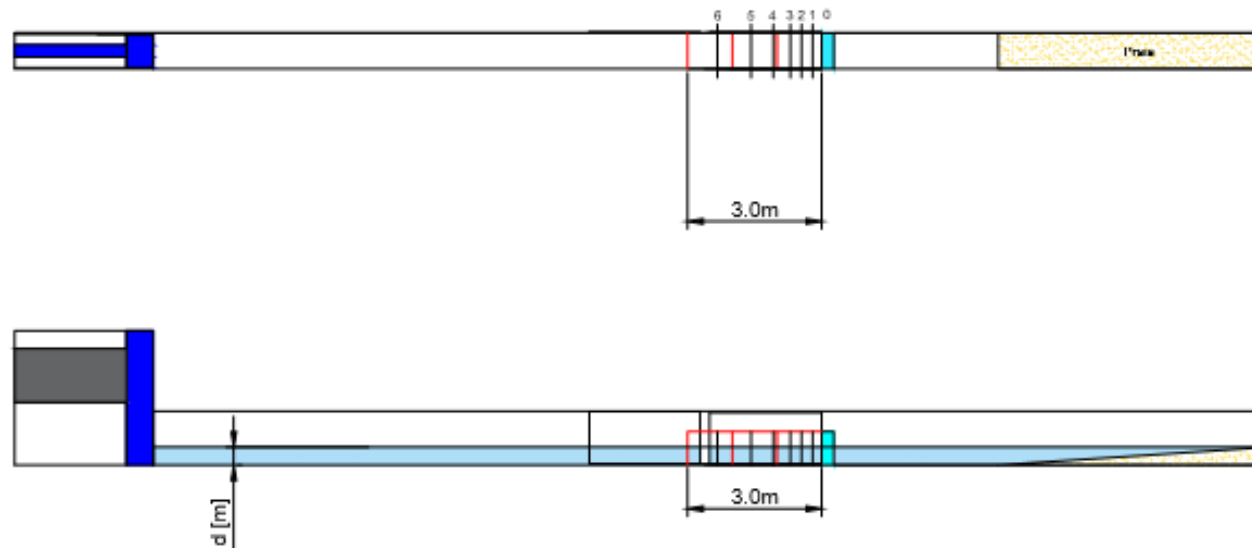
Planta:



Anexo B 1- Configuração 1 da 2ª série de ensaios

Configuração 2 - Metal Distendido

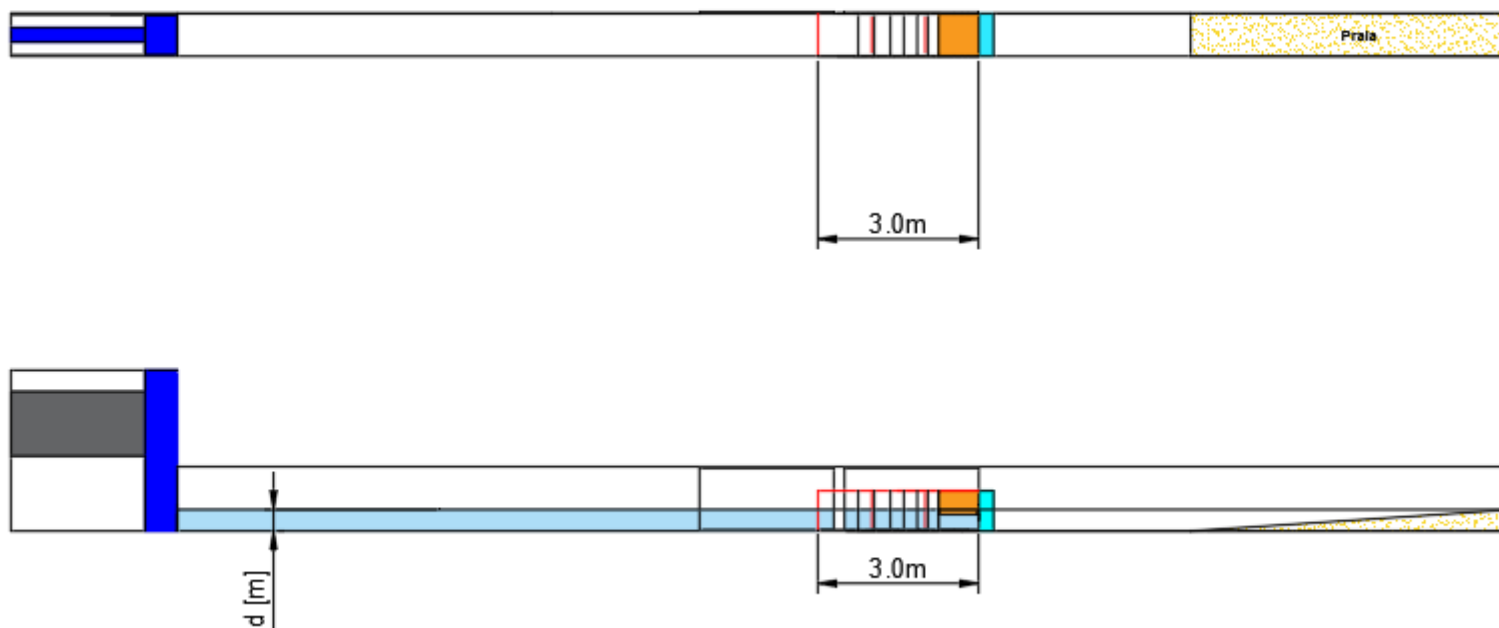
Planta:



Anexo B 2 - Configuração 2 da 2ª série de ensaios

Configuração 1 e 2 - Elementos Flutuantes

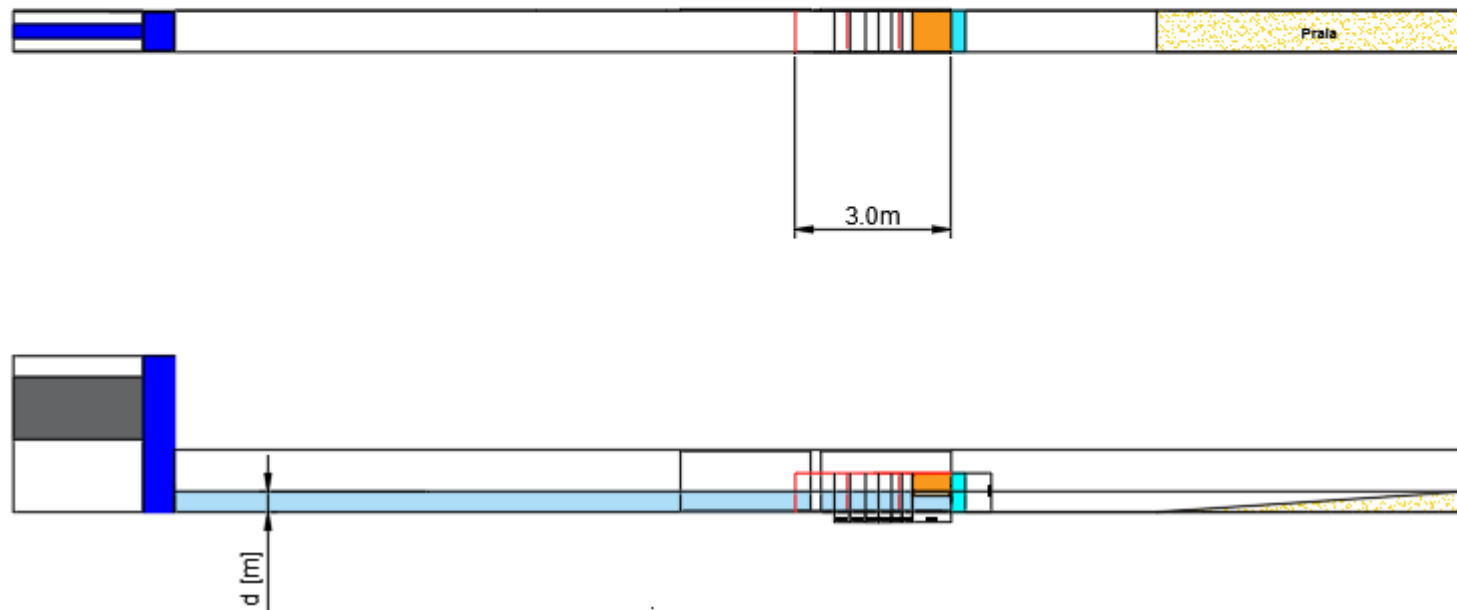
Planta:



Anexo B 3 - Configuração 1 e 2 da 3ª série de ensaio

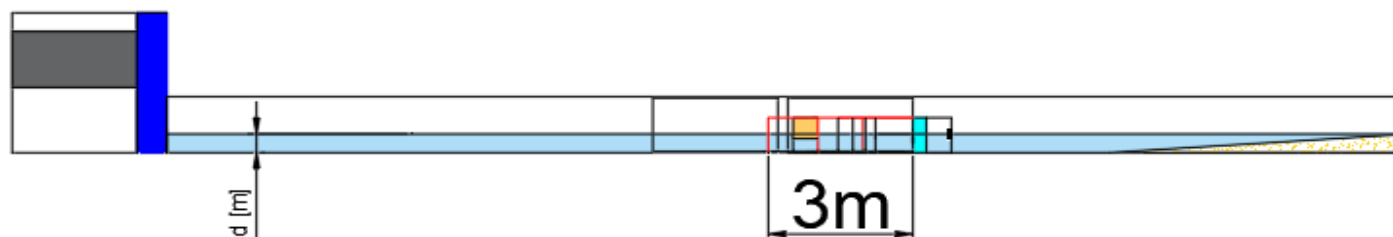
Configuração 3 e 4 - Elementos Flutuantes

Planta:



Anexo B 4 - Configuração 3 e 4 da 3ª série de ensaios

Configuração 5 - Elementos Flutuantes

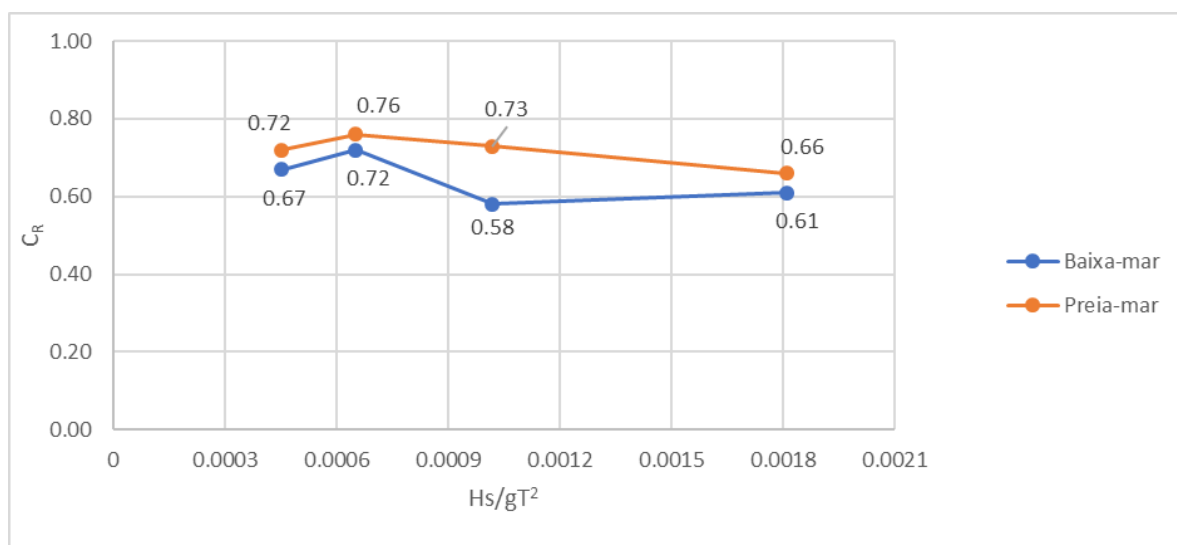


Anexo B 5 - Configuração 5 da 3ª série de ensaios

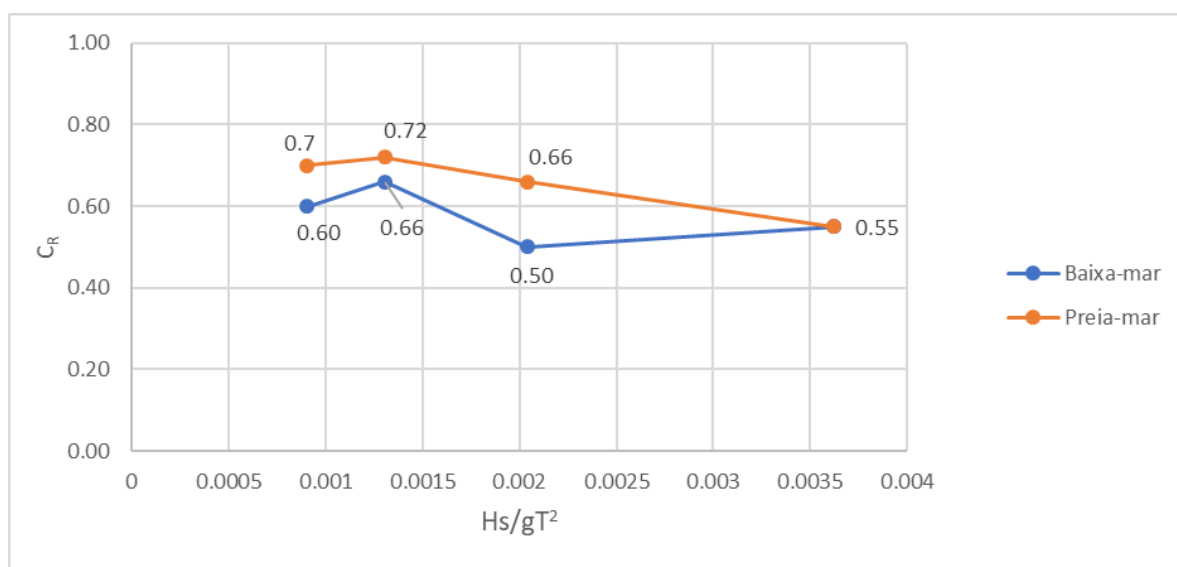
ANEXO C

Análise de Resultados da Agitação Regular

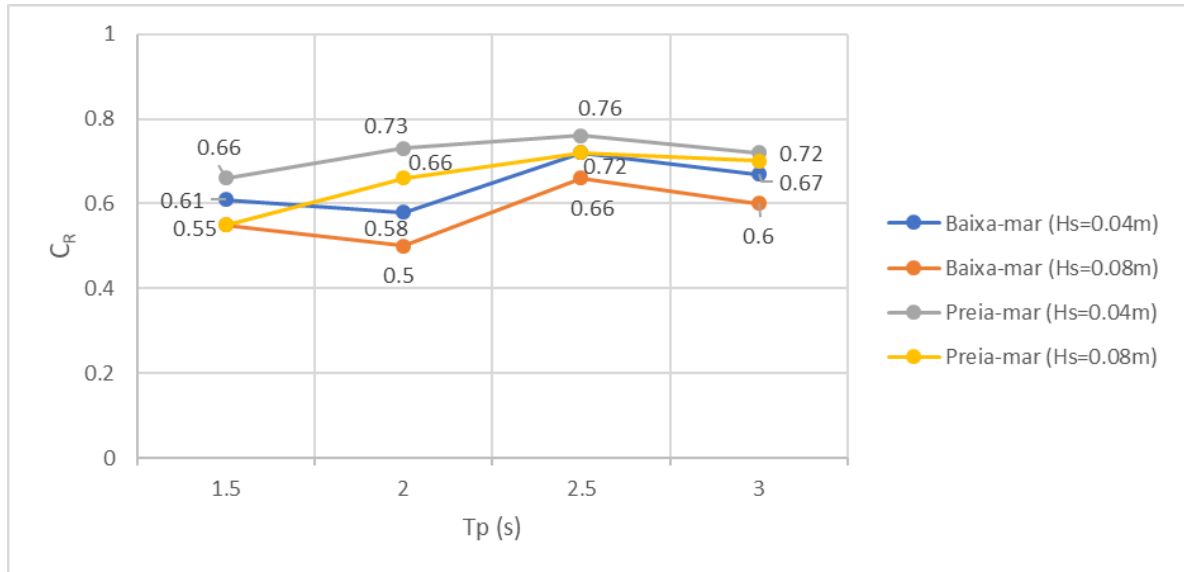
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 1 de ensaios, configuração 1.



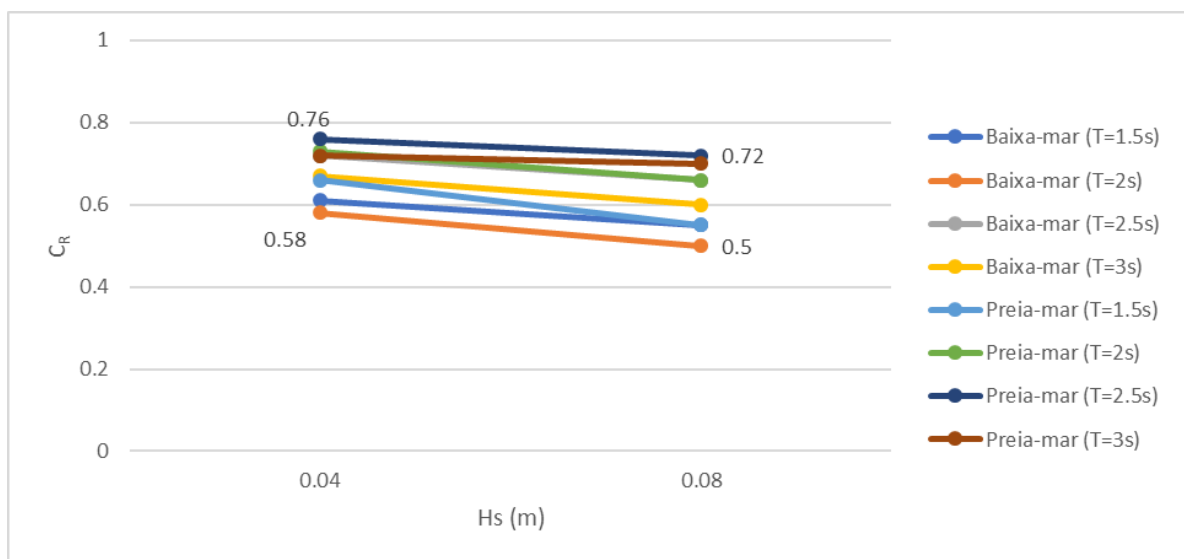
Anexo C. 1 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 2 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

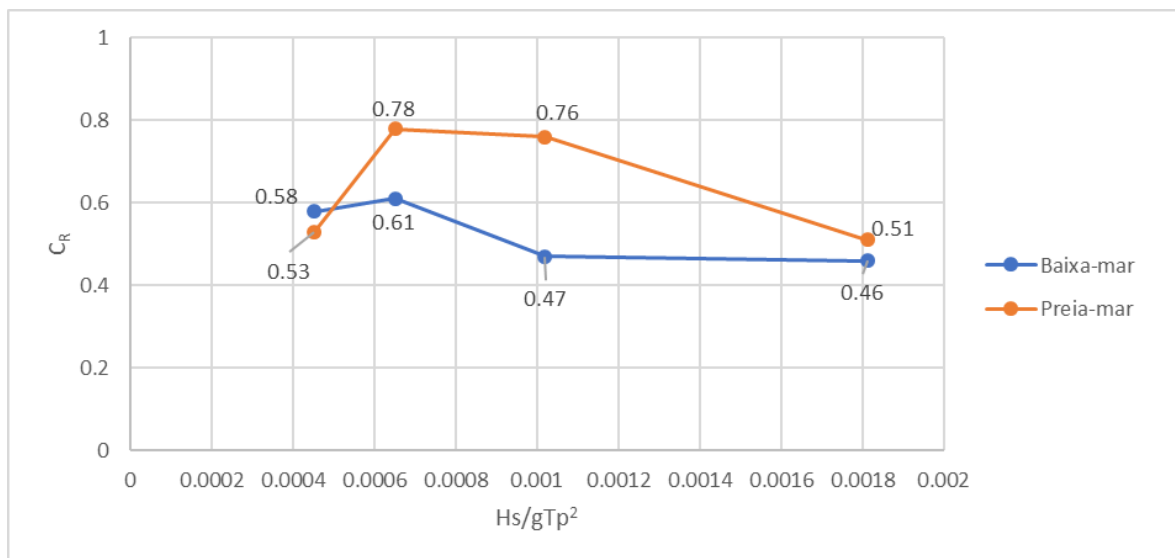


Anexo C. 3 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

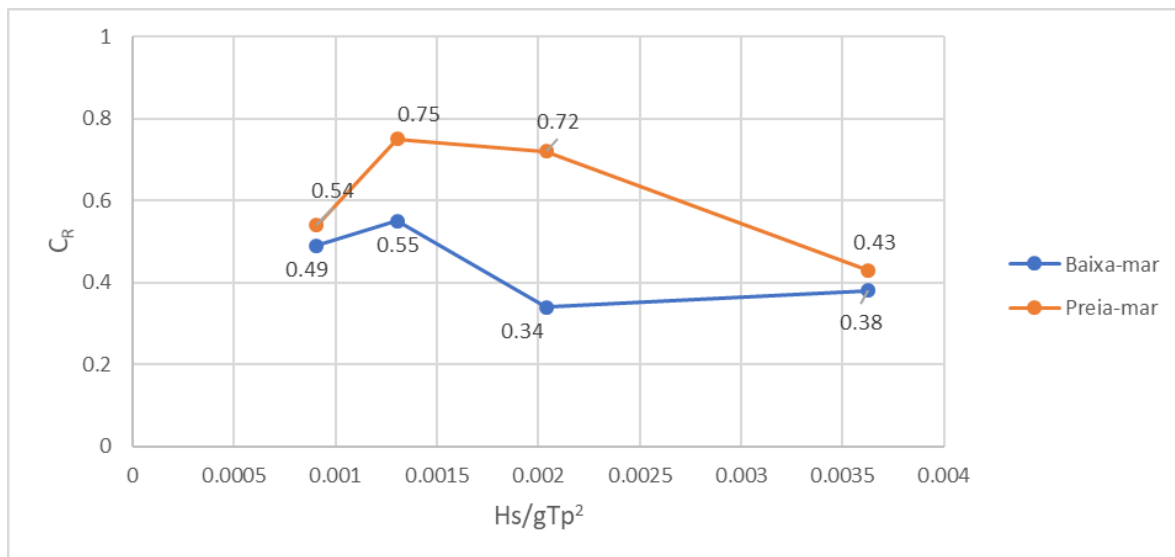


Anexo C. 4 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

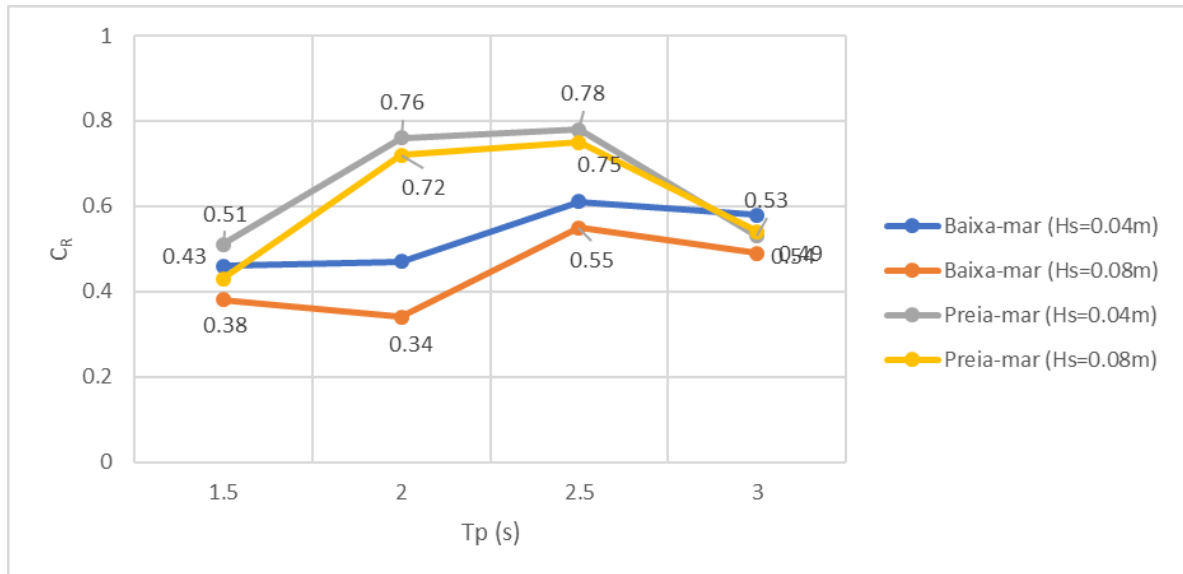
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 1 de ensaios, configuração 2.



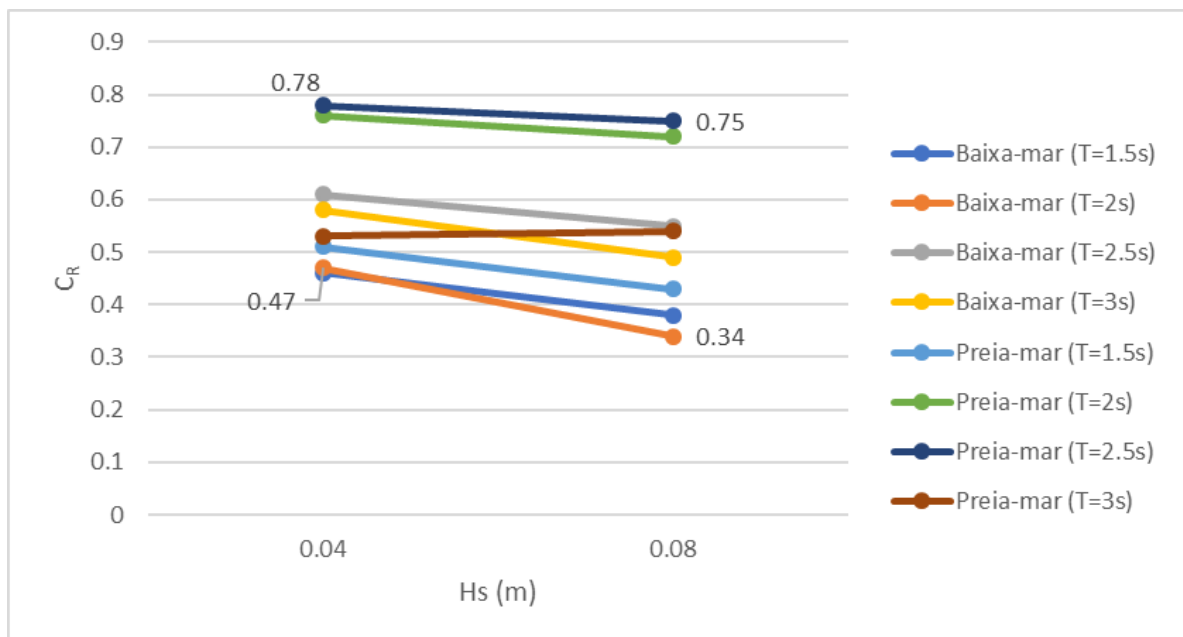
Anexo C. 5 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 6 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

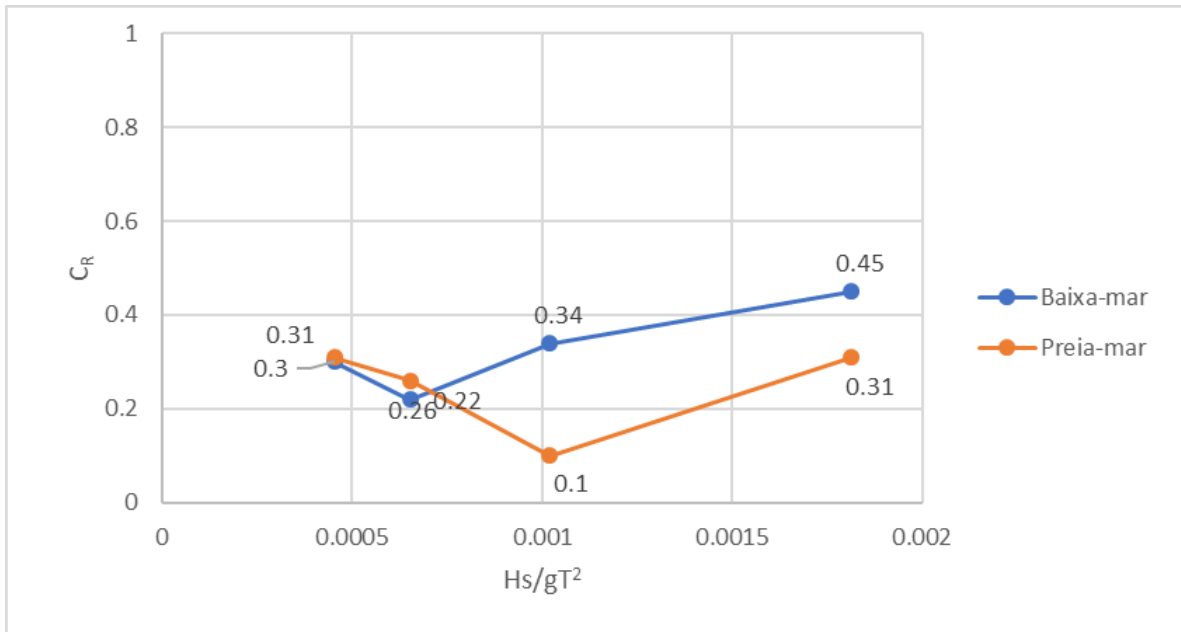


Anexo C. 7 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré

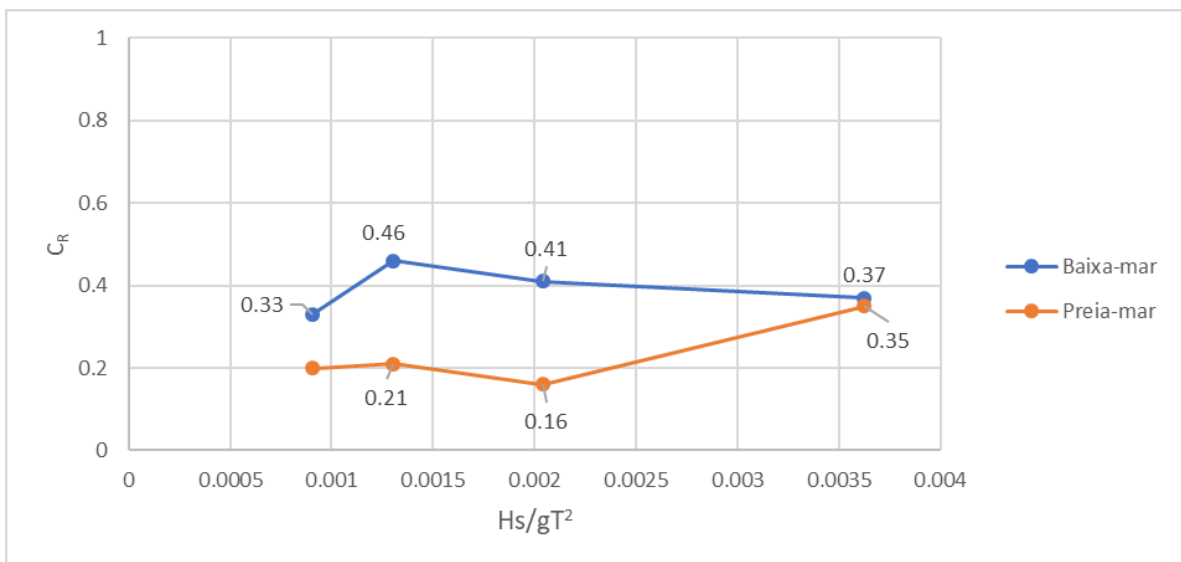


Anexo C. 8 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

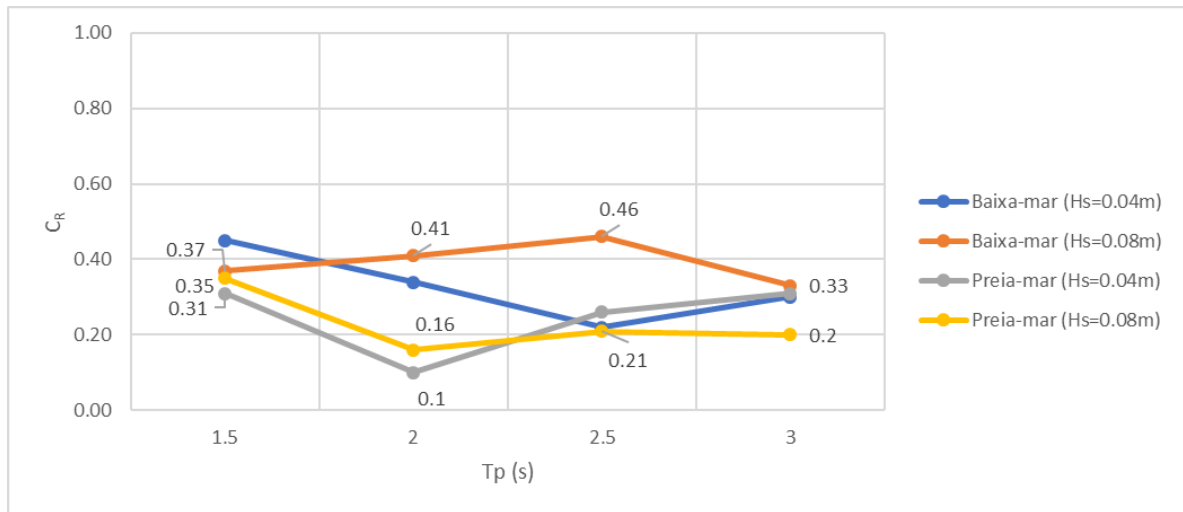
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 2 de ensaios, configuração 1.



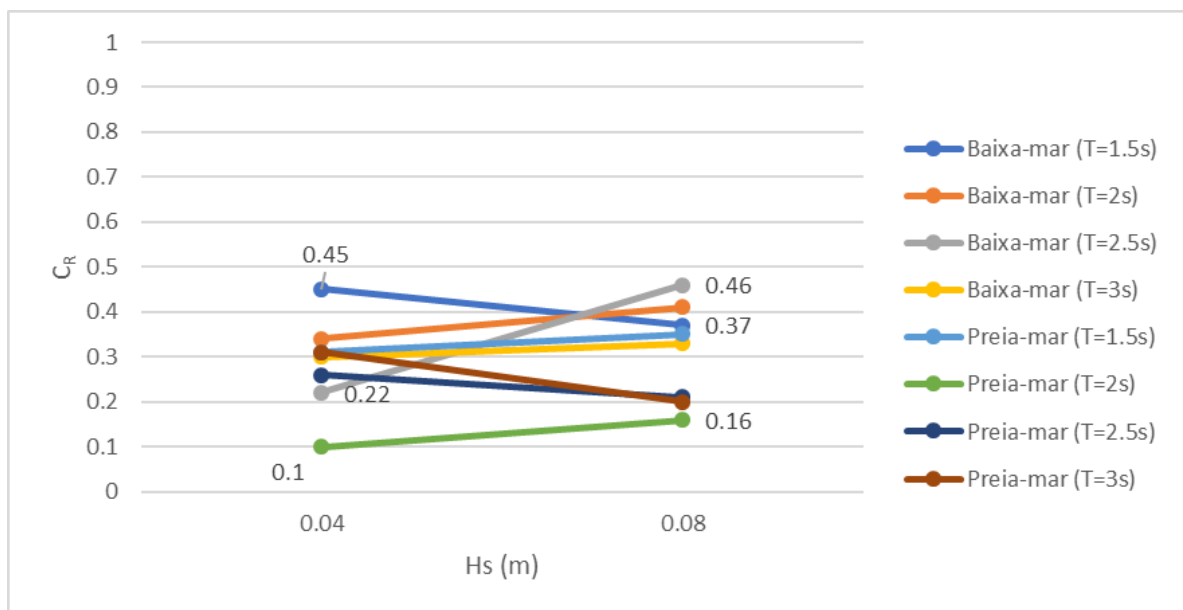
Anexo C. 9 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 10 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

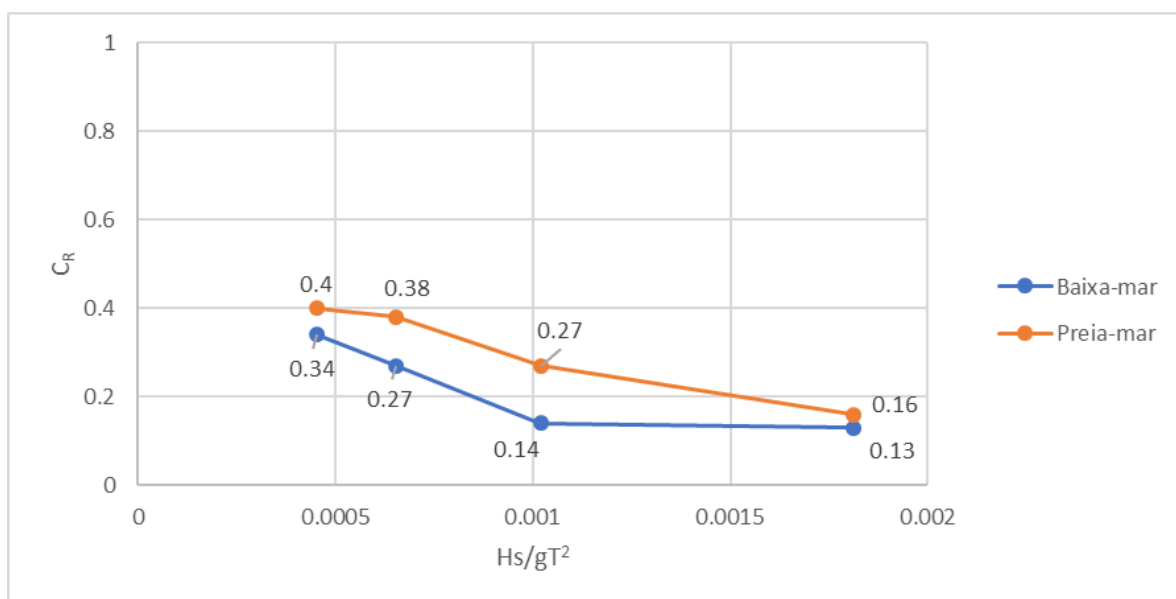


Anexo C. 11 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

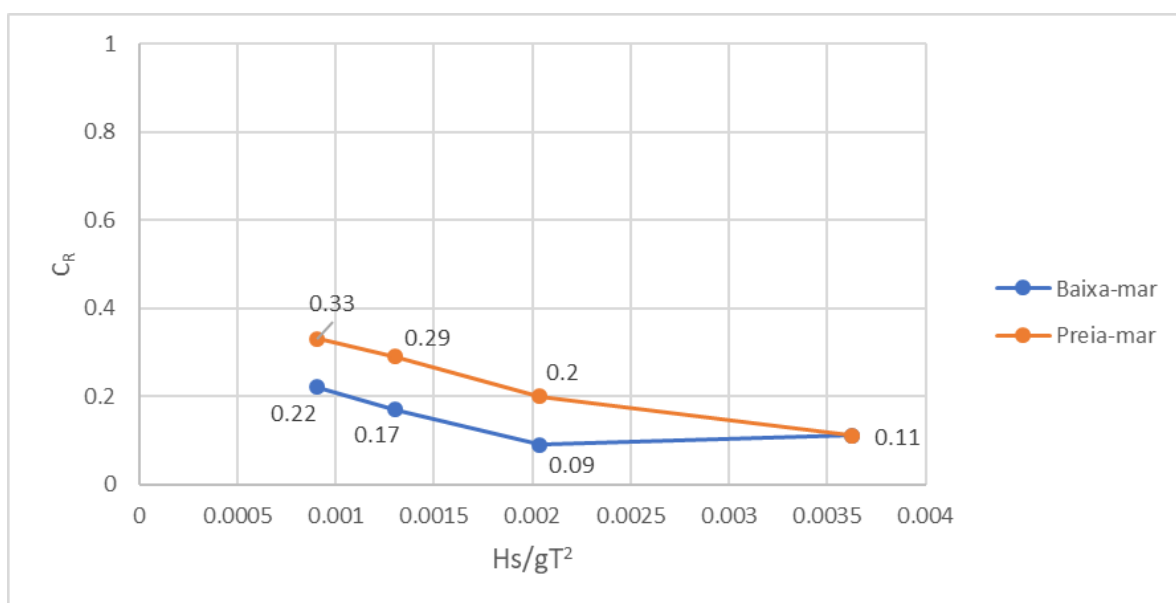


Anexo C. 12 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda.

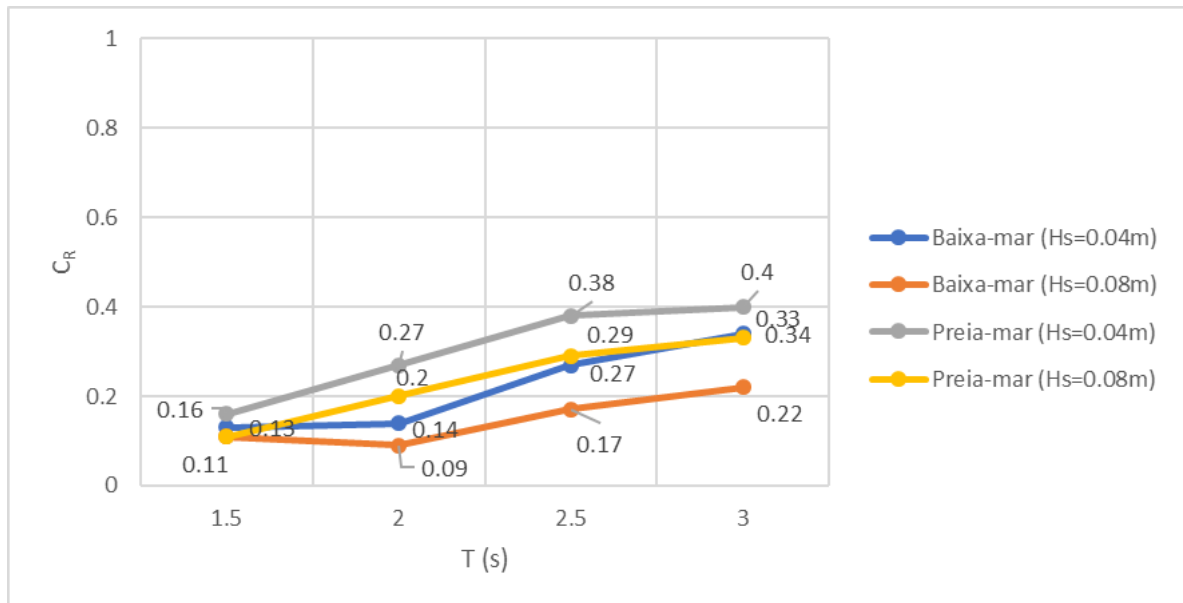
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 2 de ensaios, configuração 2.



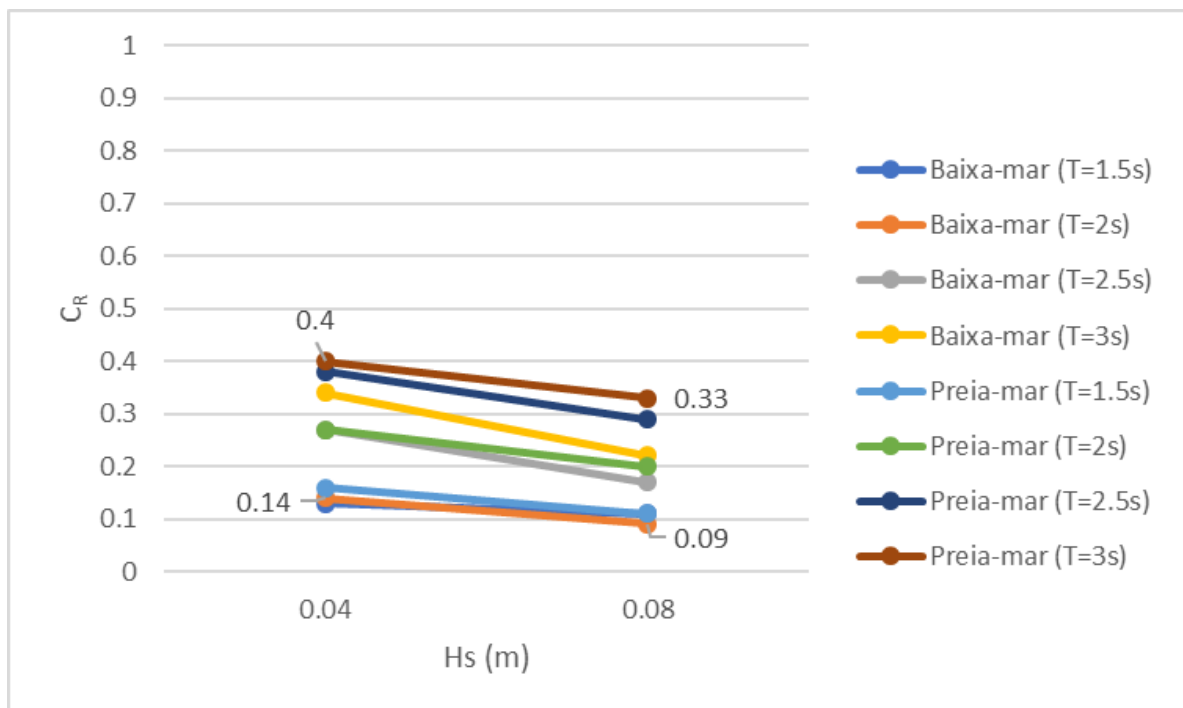
Anexo C. 13 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 14 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

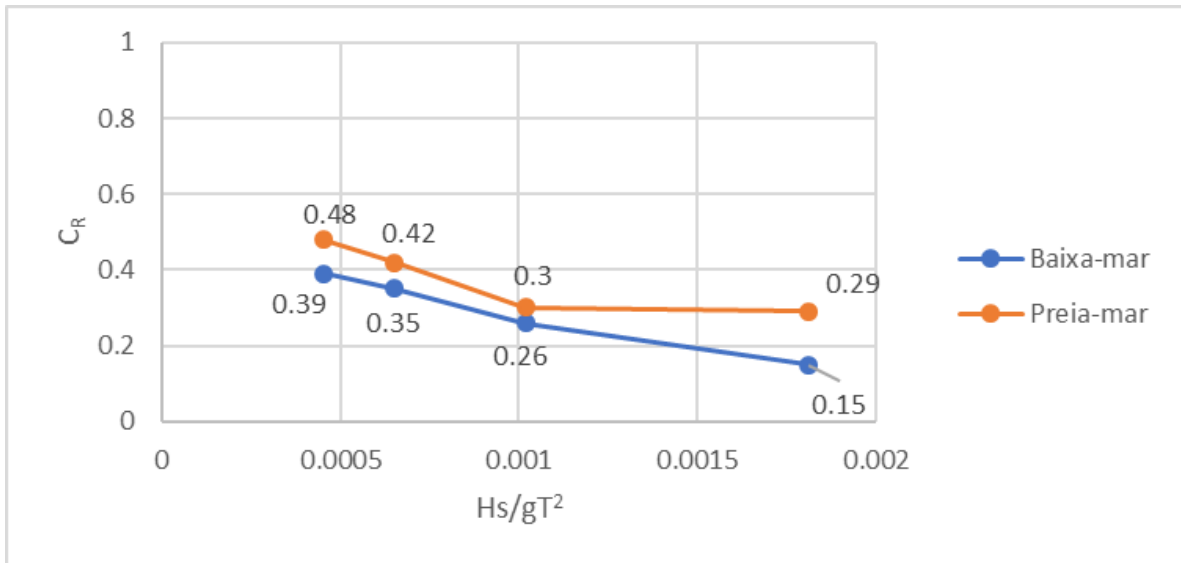


Anexo C. 15 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

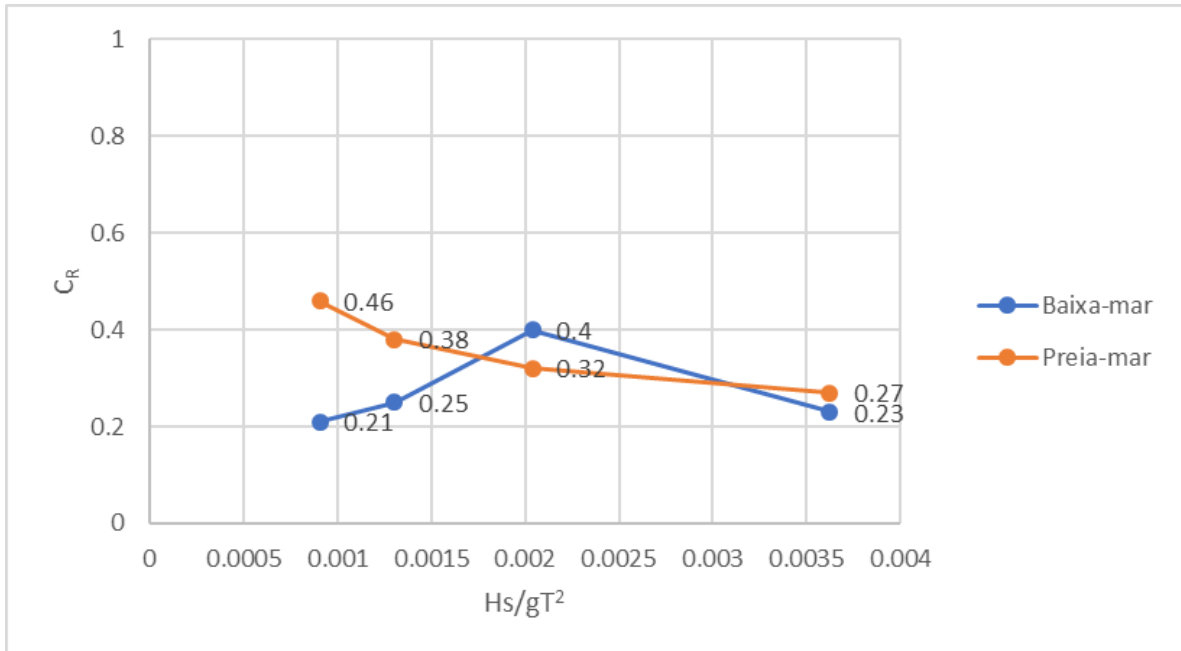


Anexo C. 16 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

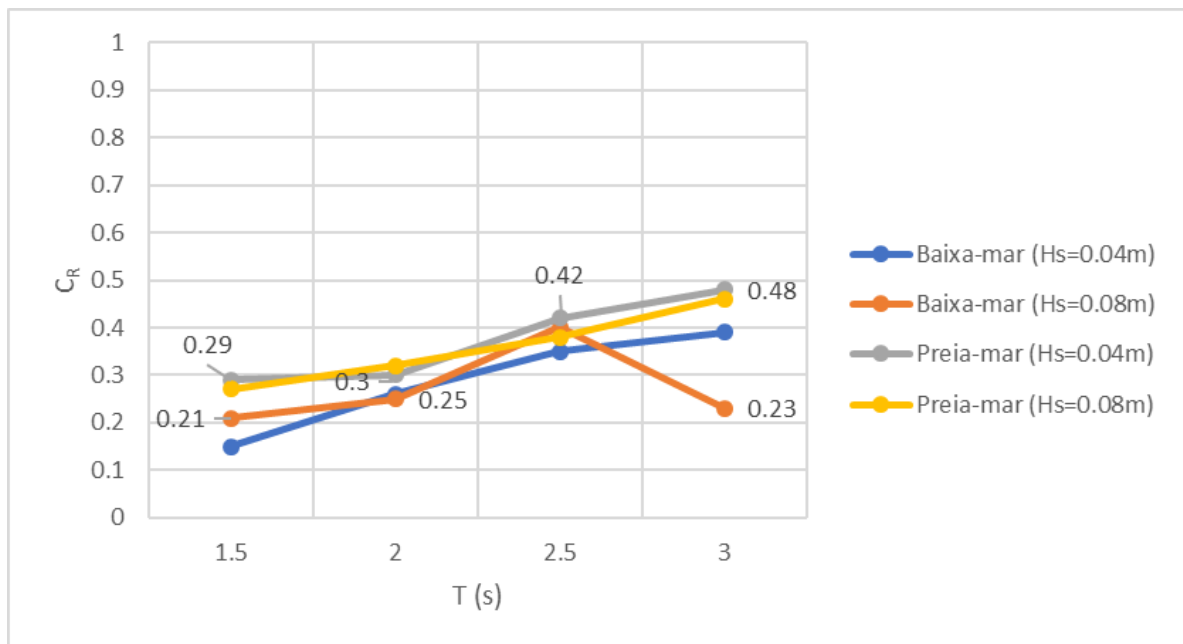
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 2 de ensaios, configuração 3.



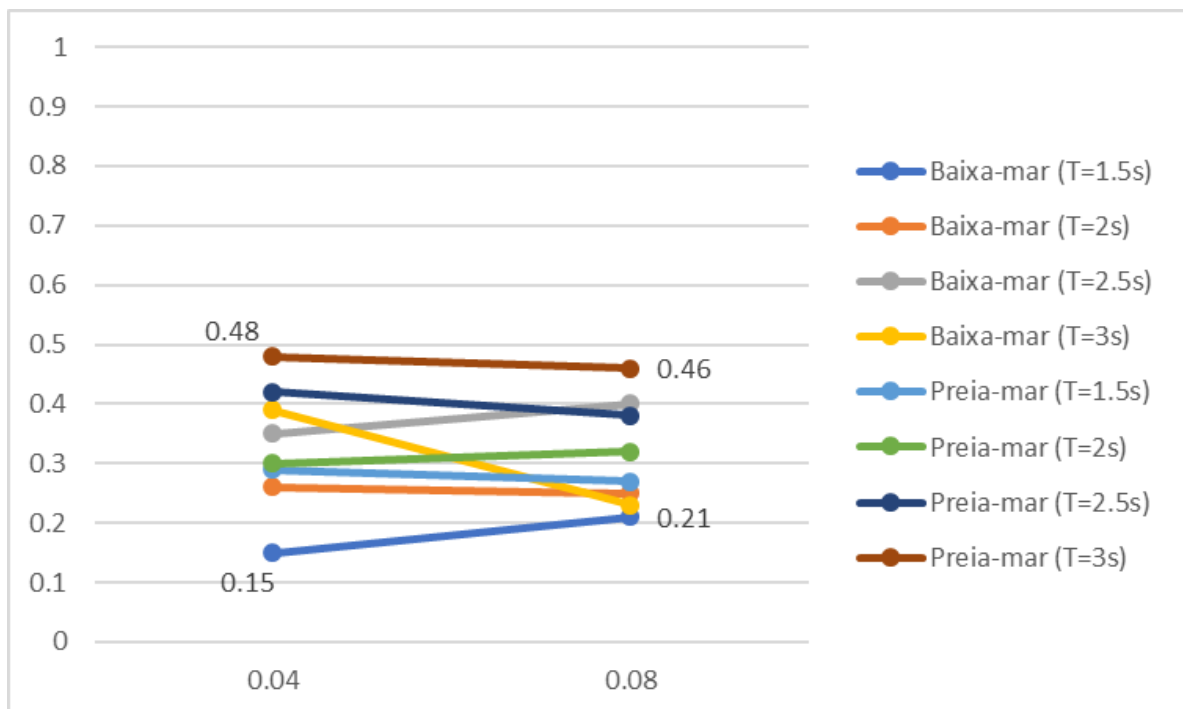
Anexo C. 17 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 18 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

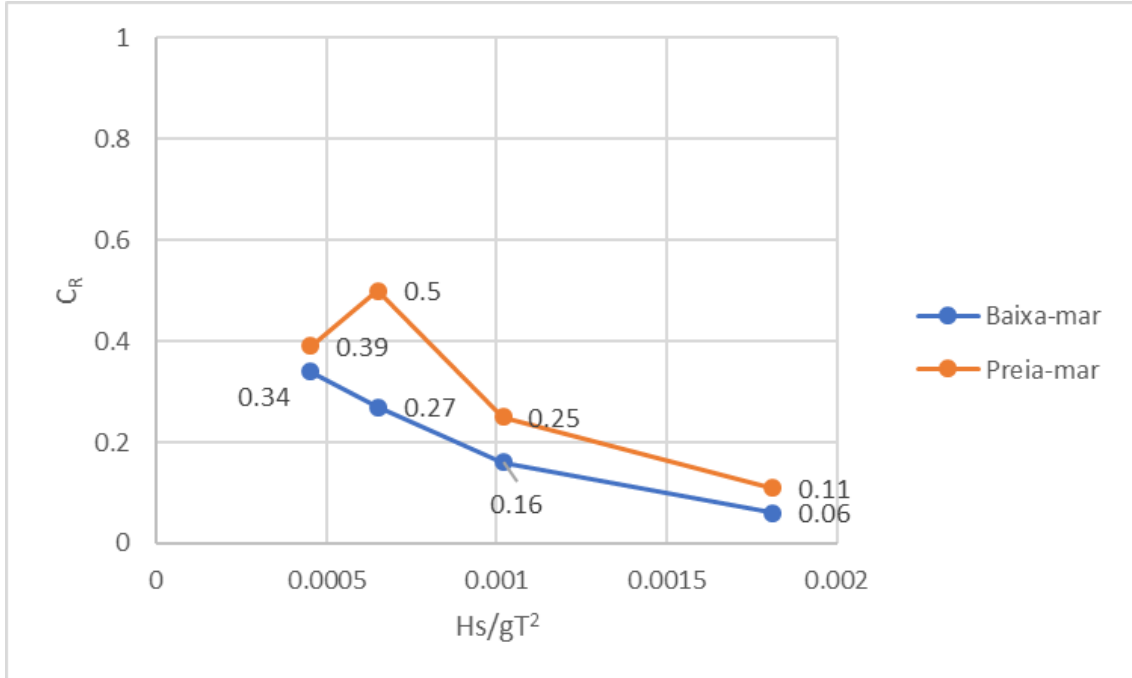


Anexo C. 19 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

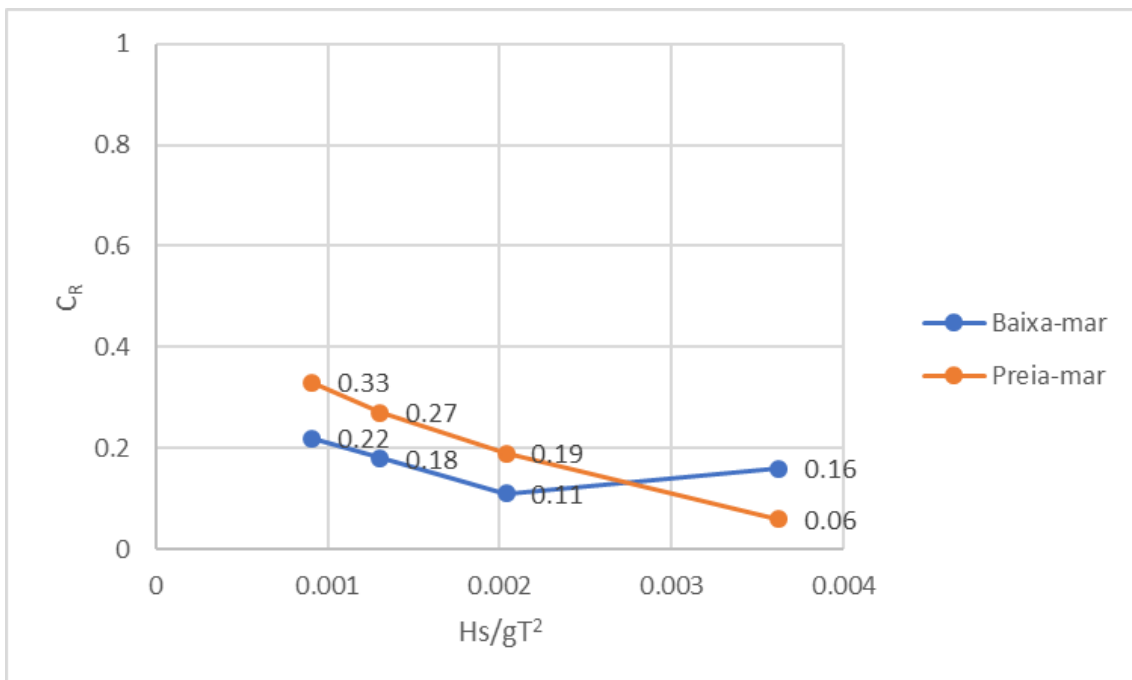


Anexo C. 20 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

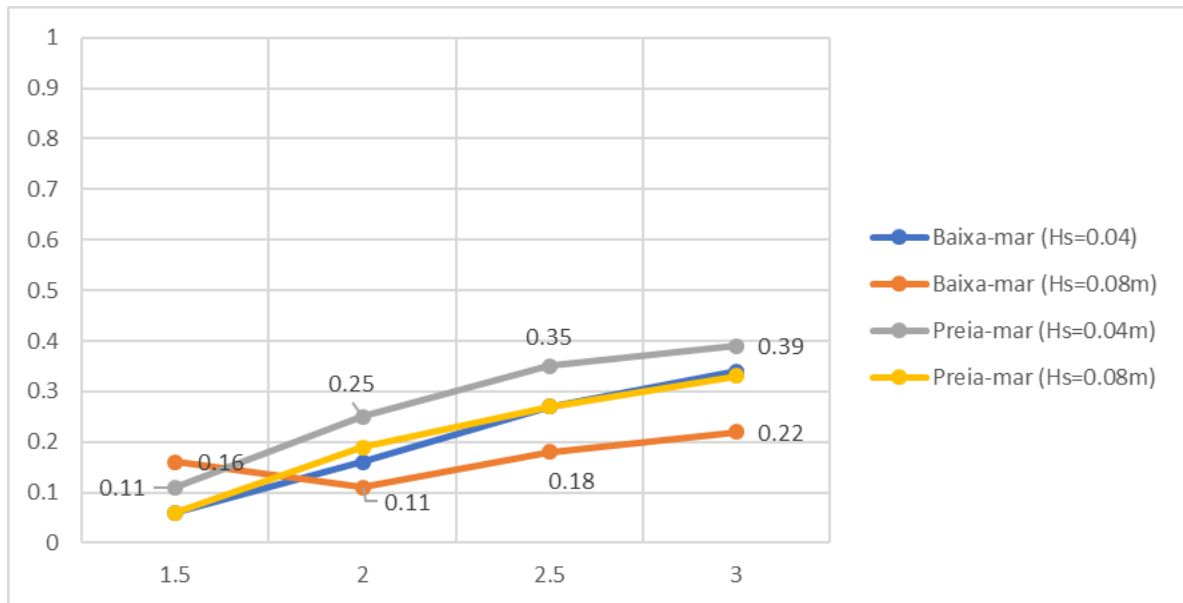
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 2 de ensaios, configuração 4.



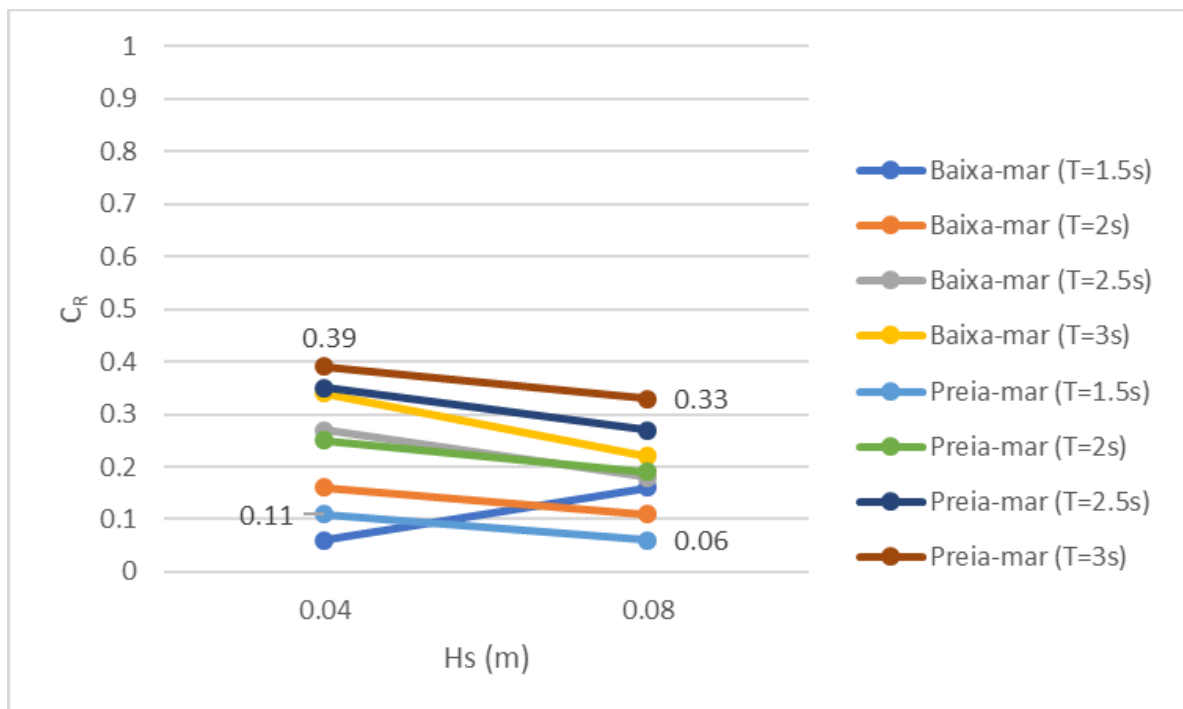
Anexo C. 21 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 22 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.

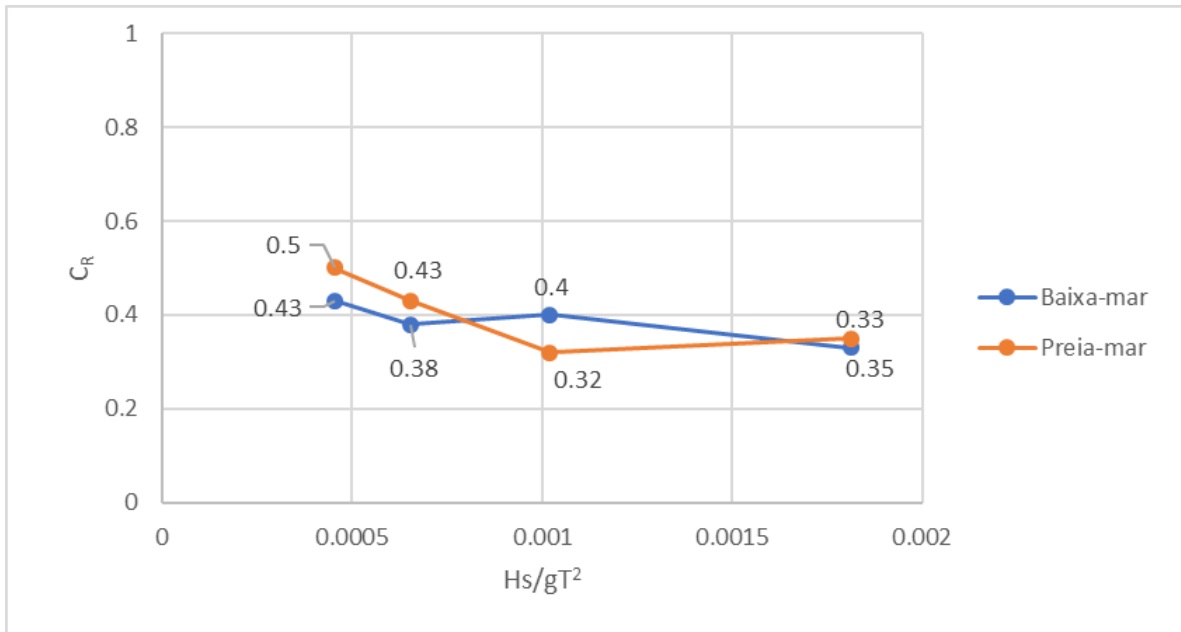


Anexo C. 23 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.

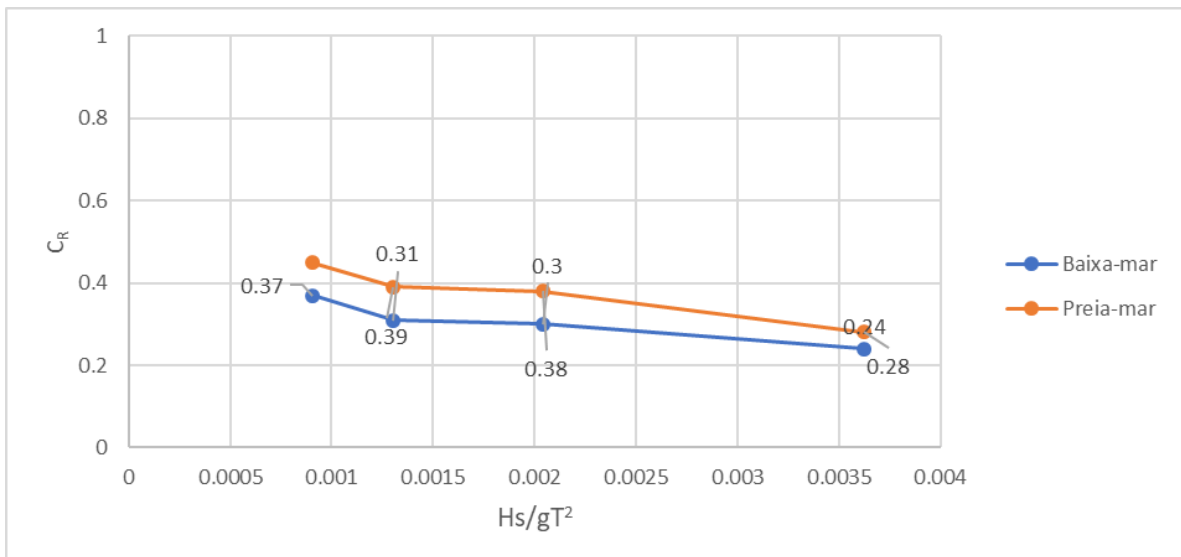


Anexo C. 24 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

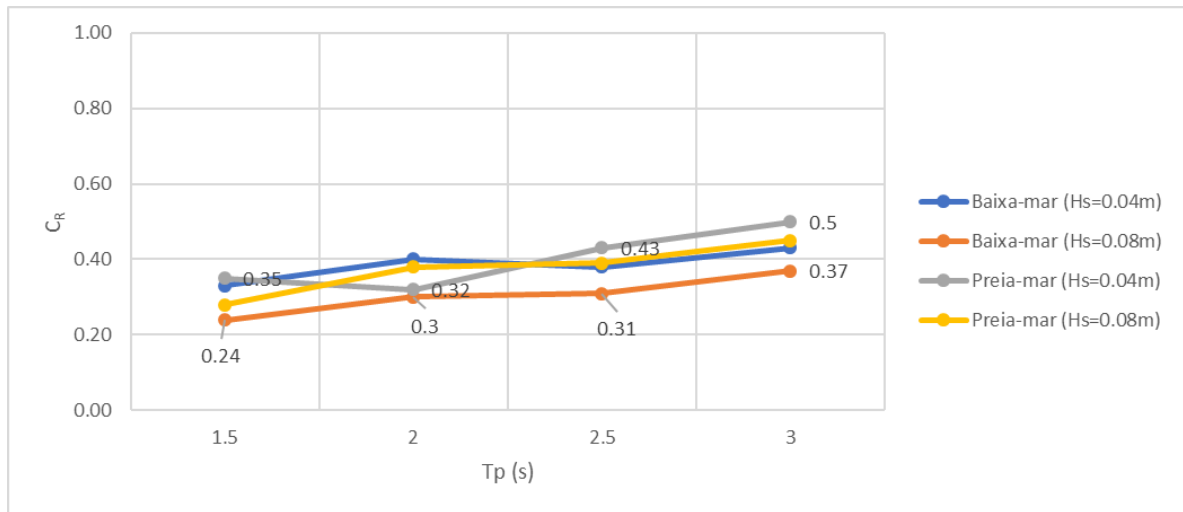
- Gráficos resultantes da análise da reflexão da agitação regular para a série 2 de ensaios, configuração 5.



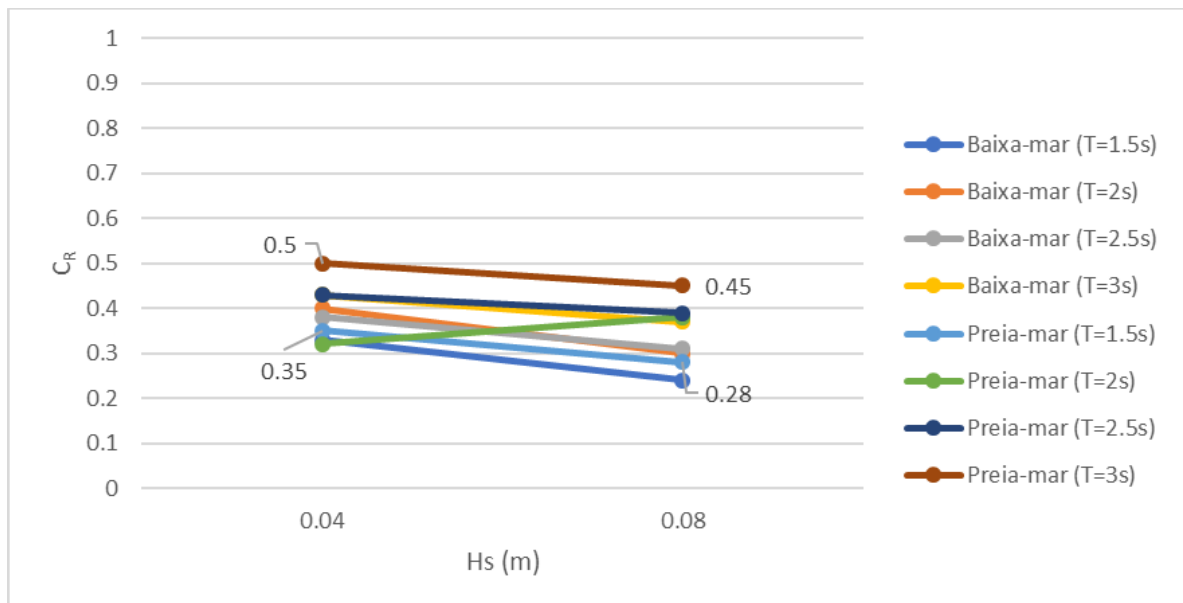
Anexo C. 25 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,04m.



Anexo C. 26 - Variação do coeficiente de reflexão em função do parâmetro adimensional para uma altura de onda significativa de 0,08m.



Anexo C. 27 - Variação do coeficiente de reflexão em função do período de pico, para as duas alturas de onda e os dois níveis de maré.



Anexo C. 28 - Variação do coeficiente de reflexão em função da altura de onda

